



TEMPLO “FLOR DE LOTO”

Estudio, análisis y modelización mediante SAP2000 de la estructura de un edificio relevante de la arquitectura moderna y contemporánea (2 de 3)
MES-F0079



GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA
2015 - 2016

ALUMNO: MIGUEL ÁNGEL ESCUSA MARTÍNEZ
TUTOR: DAVID GALLARDO LLOPIS



Índice

Índice de Imágenes	4
Introducción	5
Introduction	6
Introducció	7
Templo Flor de Loto	8
1. Datos Generales	8
2. Arquitecto	8
3. Diseño	9
4. Geometría	10
_ Hojas de Entrada y Hojas Exteriores.....	11
_ Las Hojas Superiores	11
_ Arcos Interiores	11
_ Cúpula Interior.....	12
5. Ajustes de Construcción	12
6. Secuencias de la Construcción	13
_ Arco	13
_ Hojas superiores, vigas radiales y eje central.....	13
_ Cúpula interior.....	13
_ Entrada y hojas exteriores	14
7. Encofrado.....	14
8. Cargas	17
9. Refuerzo.....	17
10. Hormigón	18
11. Ensayos y Maquetas	19
12. Aseguramiento de la Calidad	19
13. Revestimiento de Mármol.....	19
14. Gestión de Proyectos	20



Modelizado	22
_ Modelizado Hoja Entrada y Arcos	23
_ Modelizado Hoja Entrada y Hoja Exterior	24
_ Modelizado Hoja Superior	25
_ Modelizado Cúpula Superior	26
_ Modelizado Cúpula Inferior	27
_ Modelo General	28
 Materialización y Cargas Aplicables.....	29
1. Adjudicación de Materiales y Ajuste de Colocación	29
2. Asignación de Cargas	30
_ Peso propio	30
_ Sobrecarga de Uso	31
_ Peso Muerto del Mármol	31
_ Acción del Viento.....	31
3. Combinaciones de Cálculo.....	32
 Resultados de Cálculo	34
1. Resultados respecto ELSp	34
_ Deformada Hoja Entrada.....	34
_ Deformada Hoja Exterior	35
_ Deformada Arcos	36
_ Deformada Hoja Superior	37
_ Deformada Cúpula Superior	38
_ Deformada Cúpula Inferior.....	39
_ Deformada Modelo General	40
2. Resultados respecto ELSw.....	41
_ Deformada Hoja Entrada.....	41
_ Deformada Hoja Exterior	42
_ Deformada Arcos	43
_ Deformada Hoja Superior	44
_ Deformada Cúpula Superior	45
_ Deformada Cúpula Inferior.....	46



_ Deformada Modelo General	47
3. Comprobación Flecha Límite	47
4. Resultados respecto ELU	48
5. Consideraciones Generales de los Cálculos.....	48
 Conclusiones	 50
 Opciones de Continuación del Estudio	 52
 Bibliografía	 53
 Anexos del 1 al 16	

Índice de Imágenes

Imagen 1: Vista Atardecer Exterior Templo de Loto.....	5
Imagen 2: Vista Nocturna Exterior Templo de Loto.....	6
Imagen 3: Vista Cenital de la Cúpula.....	7
Imagen 4: Planta General.....	9
Imagen 5: Esquema Planta.....	10
Imagen 6: Sección Transversal.....	11
Imagen 7: Generación de los Arcos, Entrada y Hojas Interiores y Exteriores.....	12
Imagen 8: Orden de Ejecución de las Hojas.....	13
Imagen 9: Generación de los Arcos, Entrada y Hojas Interiores y Exterior.....	15
Imagen 10: Vista del Encofrado de los Arcos.....	15
Imagen 11: Detalle del Encofrado de la Hoja de Entrada.....	16
Imagen 12: Detalle y Etapas de la Hoja Interior.....	16
Imagen 13: Detalle de Colocación del Mármol.....	20

Figuras de realización propia, como diagramas, generadas a través del programa SAP2000.

Introducción

Templo, Loto, Cálculo Estructural, Cáscaras, Hormigón.

Gran parte de la arquitectura actual está fuertemente influenciada por la búsqueda de la complejidad y dificultad para poder resaltar y, en gran parte, destacar sobre el resto de edificaciones. Esto es debido a la ingente cantidad de obras y nuevos proyectos, tanto a pequeña como a gran escala, que se realizaron en las últimas décadas.

Aunque se está reconociendo esta complejidad de ejecución en la arquitectura, esto no quiere decir que no se busque la simplicidad. Sin embargo, vemos que la simplicidad y la claridad estética pueden derivar de la complejidad interior.

Bajo estas premisas, el objeto de este estudio, es el de detallar la fórmula estructural llevada a cabo en uno de los edificios relevantes de la arquitectura del siglo XX, que, basado en la pureza de líneas y simplicidad visual, conlleva un gran cálculo estructural tras él.

Posteriormente, llevaremos a cabo el cálculo de la estructura realizada mediante herramientas actuales, como es el SAP2000, y bajo las premisas adoptadas en el momento de su construcción. De esta manera podremos observar el porqué de la solución constructiva y estructural empleada y las diferencias de cálculo existentes.

Para ello emplearemos y estudiaremos la cubierta del “Templo de Loto” en Delhi de Fariborz Sahba. Se trata de una de las construcciones relevantes e icónicas del siglo XX, de gran complejidad tanto estructural como constructiva.



Imagen 1: Vista Atardecer Exterior Templo de Loto

Introduction

Temple, Lotus, Structural Calculations, Shell, Concrete.

Much of the current architecture is strongly influenced by the pursuit of complexity and difficulty to highlight and largely stand out from the other buildings. This is due to the enormous amount of work and new projects, both small and large scale, that took place in recent decades.

While recognizing this complexity is implementing in architecture, it does not mean that simplicity is not sought. However, we see that simplicity and aesthetic clarity can derive from the inner complexity.

Under these assumptions, the object of this study is to detail the structural formula implemented in one of the important buildings of the twentieth century architecture, which, based on the purity of lines and visual simplicity, carries great structural calculation behind it.

Subsequently, we will carry out the calculation of the structure made by current tools, such as SAP2000, and under the assumptions adopted at the time of its construction. We will be able to see the reasons of the constructive and structural solutions were used and the differences in calculation.

We will use and study the cover of "Lotus Temple" in Delhi Fariborz Sahba. This is one of the important and iconic buildings of the twentieth century, with a great complexity, either structural or constructive.



Imagen 2: Vista Nocturna Exterior Templo de Loto

Introducció

Temple, Loto, Càlcul Estructural, Closques, Formigó.

Gran part de l'arquitectura actual està fortament influenciada per la busqueda de la complexitat i dificultat per a poder ressaltar i, en gran mesura, destacar sobre la resta d'edificacions. Açò és degut a la ingent quantitat d'obres i nous projectes, tant a petita com a gran escala, que es van realitzar en les últimes dècades.

Encara que s'està reconeixent esta complexitat d'execució en l'arquitectura, açò no vol dir que no es busque la simplicitat. No obstant això, veiem que la simplicitat i la claredat estètica poden derivar de la complexitat interior.

Davall estes premisses, l'objecte d'este estudi, és el de detallar la fórmula estructural duta a terme en un dels edificis rellevants de l'arquitectura del segle XX, que, basat en la puresa de línies i simplicitat visual, comporta un gran càlcul estructural darrere d'ell.

Posteriorment, durem a terme el càlcul de l'estructura realitzada per mitjà de ferramentes actuals, com és el SAP2000, i davall les premisses adoptades en el moment de la seua construcció. D'esta manera podrem observar el perquè de la solució constructiva i estructural empleada i les diferències de càlcul existents.

Per a això emprarem i estudiarem la coberta del "Temple de Loto" a Delhi de Fariborz Sahba. Es tracta d'una de les construccions rellevants i icòniques del segle XX, de gran complexitat tant estructural com constructiva.



Imagen 3: Vista Cenital de la Cúpula

Templo Flor de Loto

1. Datos Generales

Arquitecto:	Fariborz Sahaba
Ingeniero Estructural:	Flint & Neill
Constructor:	Grupo de Construcción de ECC de Larsen & Toubro Limited
Diseñado en:	1976
Construido en:	1978 – 1986
Área de Construcción:	105.000 m ²
Ubicación:	Bahapur, Kalkaji, Nueva Delhi, India

2. Arquitecto

Fariborz Sahba, ciudadano canadiense nacido en 1948 en Irán, obtuvo una maestría en arquitectura en 1972 en la Facultad de Bellas Artes de la Universidad de Teherán.

En su país natal, el Sr. Sahba estuvo involucrado en el diseño de una amplia gama de edificios de prestigio. En 1987, le fue asignada por el Centro Mundial Bahai la tarea de diseñar 18 terrazas que dotaran de un enfoque de majestuosidad el Santuario del Báb, el Heraldo mártir de la Fe bahai, uno de los lugares más sagrados de su Fe. También fue nombrado director del proyecto para ejecutar la construcción del Centro Mundial Bahai en el Monte Carmel. Las Terrazas del Santuario del Bab recibieron en 1998 el Premio Ephraim Lifshitz del Municipio de Haifa y el Premio Magshim en 1999 del Consejo para un Israel Bello.

Además, Fariborz Sahaba ha recibido numerosos premios internacionales, entre ellos el Primer Premio de Honor en 1987 por “Excelencia en la Arquitectura” del Foro Interreligioso para la religión, el arte y la arquitectura, una filial del Instituto Americano de Arquitectos.

Públicamente, ha aparecido su obra en casi 400 revistas y periódicos de todo el mundo.

En 1976, el organismo rector internacional de la comunidad bahai lo seleccionó para diseñar la Casa de Adoración Bahai para el subcontinente indio en Nueva Delhi, India.

Se trata de su mayor obra y la más conocida, siendo desarrollada en este documento.



3. Diseño

Los templos de los Baháis son bien conocidos por su esplendor arquitectónico, y el templo construido en Delhi es una continuación de esta tradición. Antes de emprender el diseño del templo, el arquitecto, Sr. Fariborz Sahba, había viajado extensivamente a través de la India para estudiar la arquitectura de esta tierra, siendo impresionado por el diseño de los templos, así como por el arte y los símbolos religiosos, en donde la flor de loto siempre desempeñó un papel importante. Fue influenciado por esta experiencia y en un intento de llevar a cabo el concepto de pureza, sencillez y frescura de los Baháis, concibió el templo en Dehli con la forma de esta flor.

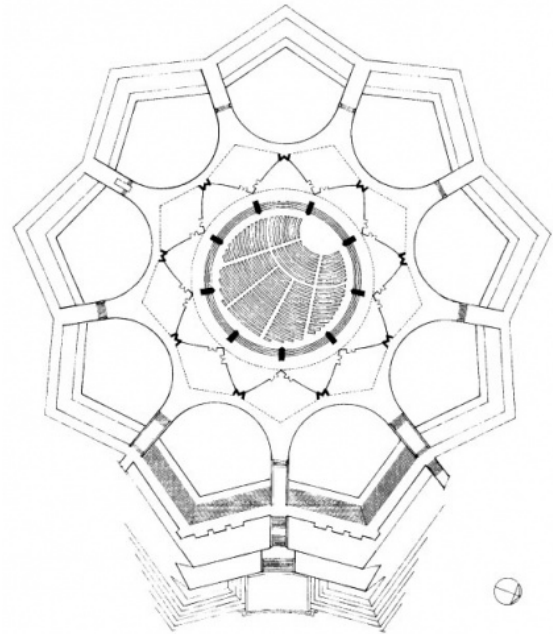


Imagen 4: Planta General

El templo da la impresión de ser una flor de loto semiabierta, a flote, rodeado de sus hojas. Cada componente del templo se repite nueve veces, imitando la estructura organizada y radial de la misma.

Flint & Neill Partnership de Londres fueron los consultores y el grupo de construcción ECC de Larsen & Toubro Limited fueron los contratistas responsables de construir el templo.

Este complejo templo, visto desde el diseño, consta del espacio principal de la adoración, un bloque auxiliar que alberga el centro de recepción, la biblioteca y el edificio administrativo y el bloque de baños. También consta de un sótano para acomodar los componentes eléctricos y de mantenimiento y una superestructura en forma de loto en la zona superior.

La zona exterior de la flor de loto son caminos con balaustradas curvas, puentes y escaleras que rodean las nueve piscinas que representan las hojas flotantes del loto. Aparte de la función estética obvia, las piscinas también ayudan a ventilar correctamente el edificio, generando una serie de corrientes de aire.

La flor de loto, vista desde el exterior, tiene tres conjuntos de hojas o pétalos, que son hechas de cáscaras de hormigón finos. El conjunto exterior de nueve pétalos, las hojas de entrada, abren hacia afuera y forman las nueve entradas junto con el pasillo externo anular. El siguiente conjunto de nueve pétalos, las hojas externas, están situadas sobre las anteriores, abriendo hacia el interior y generando la iluminación a los accesos y funcionando como su cubierta. El tercer grupo de pétalos, las hojas superiores,

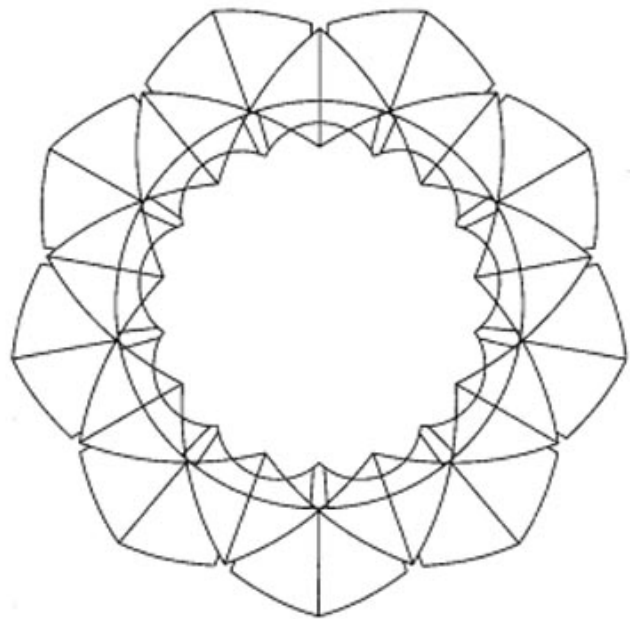


Imagen 5: Esquema Planta

aparecen, en parte, cerradas. Sólo las puntas se abren, generando la impresión de un capullo abierto en parte. Esta porción, que se eleva sobre el resto, forma la estructura principal del hall central del templo. Puesto que el loto está abierto en la parte superior, un vidrio y el acero de la azotea en el nivel de las vigas radiales proporciona protección contra la lluvia y facilita la entrada de luz natural en la sala central.

Las hojas interiores se unen a las hojas superiores de tal forma que van entrecruzando las costillas y caparazones en un complejo patrón. Cuando se mira desde el interior, cada capa de costillas y caparazones desaparece a medida que se levanta detrás de la siguiente capa inferior. Algunas costillas convergen radialmente y se reúnen en un eje central. Las vigas radiales que emanan de las hojas internas descritas anteriormente se reúnen en el centro de la construcción y el resto en este centro. Una almohadilla de neopreno se proporciona entre las vigas radiales y la parte superior de la cúpula interior para permitir el movimiento lateral causado por los efectos de los cambios de temperatura y el viento.

4. Geometría

El hermoso concepto de la flor de loto, como fue concebido por el arquitecto, se define por figuras geométricas como esferas, cilindros, toroides y conos. Estas formas fueron traducidas en ecuaciones, que luego fueron utilizadas como base para el análisis estructural y planos de ingeniería. La geometría resultante era tan compleja que tomaron a los diseñadores más de dos años para completar los planos del templo.

— Hojas de Entrada y Hojas Exteriores

Las superficies de la cáscara en ambos lados de la cresta de la entrada y las hojas exteriores se forman mediante esferas de radios diferentes, con sus centros situados en diferentes puntos dentro del edificio. Hay un conjunto de esferas para las hojas de entrada, algunos de los cuales definen las superficies interiores, y otros que definen las superficies exteriores de las cáscaras. Los diámetros de las esferas han estado fijados para satisfacer la consideración estructural de espesor variable de la cáscara. Del mismo modo, para las hojas exteriores, otro conjunto de esferas define las superficies internas y externas de las conchas. Sin embargo, para las hojas exteriores, la cáscara es uniformemente de 133mm de espesor hacia la parte inferior y aumenta a 255mm hasta la punta.

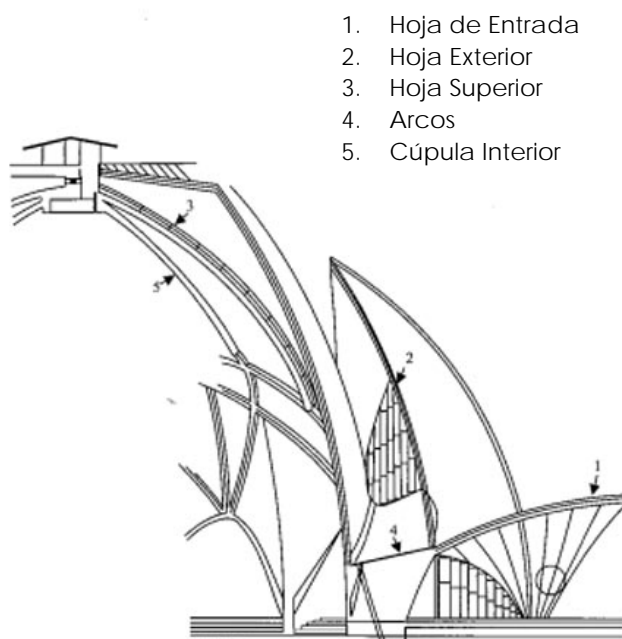


Imagen 6: Sección Transversal

La hoja de entrada es de 18,2m de ancho en la entrada y se levanta 7,8m sobre el nivel del podio. La hoja exterior es de 15,4m de ancho y se eleva hasta 22,5m sobre el podio.

La hoja de entrada es de 18,2m de ancho en la entrada y se levanta 7,8m sobre el nivel del podio. La hoja exterior es de 15,4m de ancho y se eleva hasta 22,5m sobre el podio.

— Las Hojas Superiores

Cada ondulación de la hoja superior, compuesto por una cúspide y un valle, se compone de dos superficies toroidales. Un toroide es generado cuando un círculo de cierto radio se gira alrededor del centro de un círculo de mucho mayor radio.

El interior deja lugar a una elevación de 34,3m sobre el podio interno. El nivel más bajo de cada cáscara posee una anchura máxima de 14m. En cuanto al espesor, se trata de un espesor uniforme de 200mm.

— Arcos Interiores

Todo el pasillo central está formado por nueve espléndidos arcos colocados a intervalos de 40°. La forma de los arcos está formada por superficies tanto cónicas como cilíndricas. La intersección de estas superficies proporciona interesantes contornos y mejora en gran medida la belleza de los arcos. Los nueve arcos llevan, casi en la totalidad, la carga de la superestructura.

_ Cúpula Interior

La cúpula interior está a su vez conformada por dos cúpulas. La primera se levanta radialmente hacia el centro, mientras que la segunda se aleja de las costillas centrales, cruzándose entre ellas, formando así un patrón intrincado. Finalmente, las costillas de ambas capas suben radialmente hasta reunirse en el centro, generando el lucernario anteriormente comentado.

Hasta cierta altura, el espacio entre las costillas, está cubierto por estas dos capas de cáscaras, de 60mm cada una.

5. Ajustes de Construcción

El ajuste de la geometría en el momento de ejecución plantea una tarea ardua y difícil. A diferencia de las estructuras convencionales, la forma, tamaño, grosor y otros detalles se indican en los dibujos sólo por niveles, radios y ecuaciones. Estos parámetros, por lo tanto, tuvieron que ser convertidos en un conjunto de dimensiones en cuanto a longitud, anchura, altura y espesor, fácil de entender por un jefe o capataz de carpintería. Para lograr esto, se generó un sistema de coordenadas a lo largo de X, Y y Z para cada 40°, es decir, para cada uno de los distintos ejes. De esta manera se generaron por ordenador una serie de segmentos con los puntos de coordenadas exactos. El problema inicial se simplificó gracias a este sistema de coordenadas y distancias, que un carpintero o un oficial de ferralla podría fácilmente comprender y luego llegar a ejecutar.

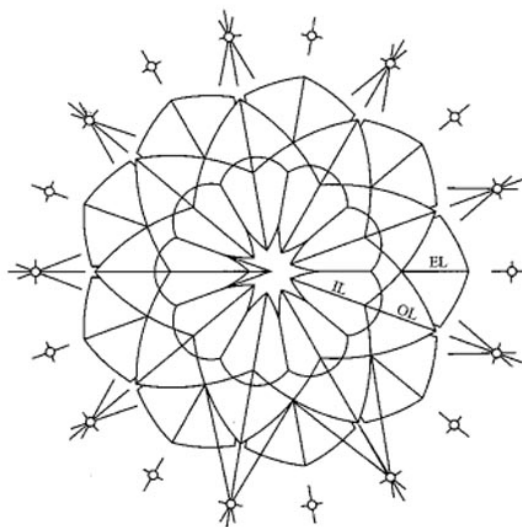


Imagen 7: Generación de los Arcos, Entrada y Hojas Interiores y Exteriores

De esta manera se realizaron dieciocho estaciones de referencia para el establecimiento de los arcos, la entrada y las hojas externas e internas. A lo largo de estas líneas, medidas en base a distancias inclinadas y verticales mayoritariamente, se establecieron puntos de extremos A y B en planta (al contrario de la metodología usual, que parte de medidas en planta para llevarlas después en vertical). Con estas medidas ya resueltas, se generaron un conjunto de plantillas de curvas, cada una de diferente forma, y se fueron desarrollando cada una de las superficies.

6. Secuencias de la Construcción

Para llevar a cabo esta construcción, se tuvieron que llevar a cabo ciertas secuencias de obra. Primeramente, construyeron el sótano y el podio interno. Después de eso, llevaron a cabo los arcos y las cáscaras del bastidor.

Teniendo en cuenta que al realizar las cáscaras y retirar los encofrados, éstas serían autosuficientes, la estructura fue dividida en las siguientes partes:

_ Arco

Los nueve arcos fueron realizados uno tras otro en dos vías, hasta que se completó el círculo. El desencofrado de cada arco se realizaría después de que los arcos adyacentes habían alcanzado la resistencia especificada.

_ Hojas superiores, vigas radiales y eje central

Después de la terminación de los arcos, fue erigido el acero estructural para la hoja interior.

Se realizaron tres partes, con diferencia de 120° , uno tras otro hasta alcanzar el nivel superior total, teniendo en cuenta que la altura final de cada uno fuera la misma. El proceso se repitió hasta que todos los segmentos se finalizaron. Posteriormente se ejecutaron los segmentos restantes, conectando los ya realizados, tomados como una actividad independiente y conectadas por las vigas radiales.

Tras el curado suficiente del hormigón se retiró totalmente el encofrado de todos los segmentos a la vez, generando así una estructura autosuficiente y con la capacidad resistente para soportar la fuerza del viento.

_ Cúpula interior

Después de la realización de las hojas internas, el tipo de acero fue modificado y fueron añadidos y solapados a los existentes de los faldones de las hojas ya ejecutadas. A partir de este punto, se montó la estructura metálica de la cúpula interior. Primeramente, se ejecutaron las costillas en segmentos de 120° , rellenando posteriormente las cáscaras intermedias.

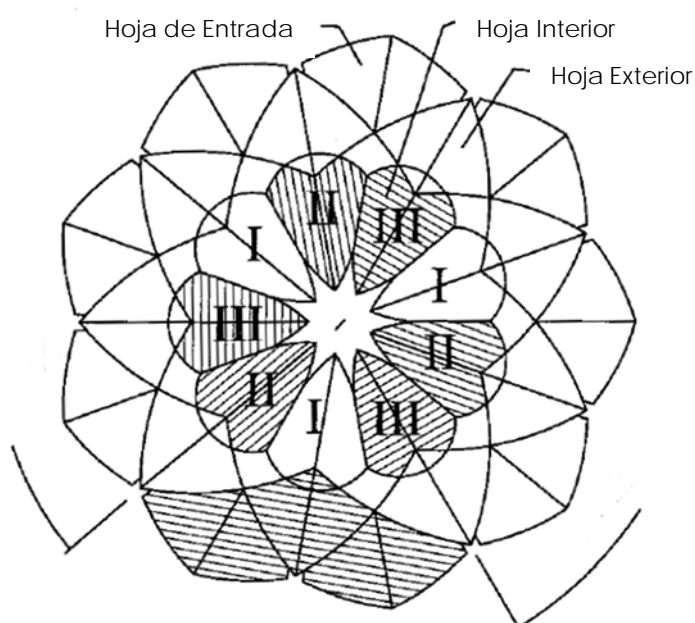


Imagen 8: Orden de Ejecución de las Hojas

Este proceso se repitió hasta que toda la cúpula fue ejecutada, retirando finalmente el encofrado de toda la cúpula.

Entrada y hojas exteriores

La construcción de la entrada y las hojas se toma como una actividad paralela con la de las hojas internas y la cúpula interior.

En primer lugar, se toman dos hojas de entrada y una exterior intermedia. Después de eso, se volverá a realizar una hoja de entrada y la hoja exterior intermedia, siendo la de entrada ejecutada en primer lugar.

El desencofrado fue iniciado con un par de hojas exteriores y seguido por la hoja de entrada intermedia. De esta manera las hojas restantes se desencofrarán como y cuando el hormigón alcanza la resistencia adecuada.

7. Encofrado

La posible desviación fue una consideración importante en el diseño de los encofrados. La desviación máxima admitida fue limitada a 3mm en una distancia de 1m (incluyendo en esta medida los errores en la fabricación y el montaje).

Se consideraron los siguientes aspectos en la disposición general del encofrado:

- a. El hormigonado debe realizarse ejecutando tres cáscaras a la vez, en secciones de 120°, para que las cargas laterales sobre el encofrado sean las menores posibles.
- b. Las juntas de construcción debían evitarse lo máximo posible para que la superficie expuesta del hormigón no mostrara ninguna línea fuera del patrón arquitectónico. Para la hoja interior, las juntas deberían estar situadas por encima de 24,8m de nivel, para que no se vieran desde el nivel del suelo. El resto de las cáscaras fueron realizadas de una sola vez.
- c. El encofrado debe soportar las costillas radiales y las superficies sin interferir con los diferentes elementos de acero estructural. Después del desencofrado de la hoja interna, la estructura debe ser capaz de soportar el encofrado de las capas internas de la cúpula interior.

Dadas las consideraciones anteriores, se tomó una estructura consistente en nueve cúspides radiales con otros nueve marcos, con miembros circunferenciales y en diagonales, siguiendo el perfil de las costillas y conchas.

Se consideraron varias alternativas para el encofrado. Los andamios de tubo estándar fueron desestimados al ser inadecuados, teniendo en cuenta que el deslizamiento de las juntas sería difícil de calcular y controlar, particularmente debido a las cargas laterales. Por otra parte, los andamios de acero estructural con uniones atornilladas también fueron desestimados, teniendo en cuenta que se necesitaría un alto grado de precisión en la fabricación y montaje, para que coincidieran cada uno de los agujeros de los pernos en las diferentes inclinaciones de cada parte. De esta manera, se tomó como la solución más conveniente, los encofrados de acero estructural con uniones soldadas, ya que se evitarían las desviaciones debido a deslizamiento de juntas y la fabricación y el montaje será comparativamente más fácil.

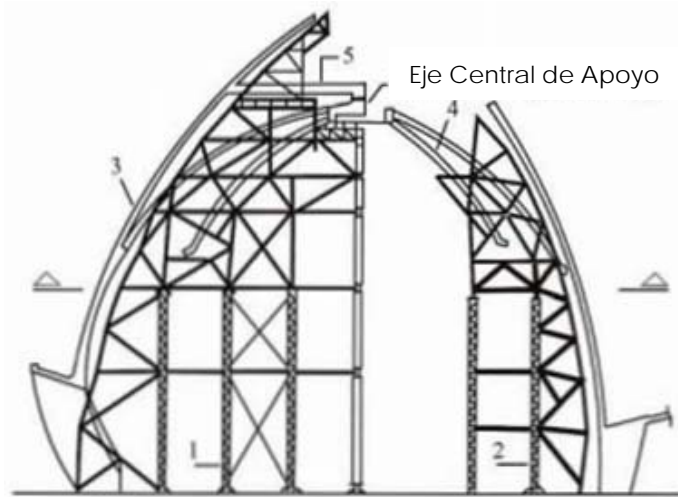


Imagen 9: Encofrado de las Hojas Superiores con apoyo en el eje central

Las superficies interiores de las cáscaras tienen una superficie de hormigón uniforme expuesta con patrones arquitectónicos. Para las hojas interiores, estos patrones fueron formados fuera de los planos radiales y verticales de intersección de la superficie del toroide. Para el exterior, las hojas de entrada y la cúpula interior, se formaron los patrones de longitudes y latitudes de las esferas. El encofrado se diseñó de manera que las vías de madera apoyaran los paneles en lugar del patrón regular del acero estructural de apoyo a los miembros de la estructura espacial.



Imagen 10: Vista del encofrado de los Arcos

Se realizaron maquetas a gran escala de la superficie inferior de cada una de las cáscaras, marcando los patrones arquitectónicos en ellas. El marco de cada panel fue fabricado según dimensiones calculadas y comprobado con mediciones de la maqueta.

El encofrado interior de cada pétalo era totalmente fijo de abajo a arriba con precisión. Después de que el encofrado fue aprobado, se realizaron las juntas con sellado de masilla de resina epoxi y yeso, y se aplicó una capa protectora sobre la superficie de madera contrachapada. En el caso de las cáscaras de la cúpula interior, el revestimiento de madera fue alineado por láminas de plástico reforzado con fibra y las juntas de sellado con resina epoxi. Después de esto, la ubicación de cada barra de refuerzo fue marcada en el encofrado a lo largo de las latitudes y longitudes. Para evitar impresiones de juntas en la superficie interna, el molde de los pétalos de la hoja interna se llevó a cabo en tres elevadores, algunos de ellos de 14m de altura. Para facilitar la colocación de compactación concreta y simultánea en cada vaciado, los encofrados exteriores se colocaron fila a fila. Estos paneles, por lo tanto, tuvieron que ser fijados en posición y alineación con precisión en el menor tiempo posible.

A través de los puntos seleccionados con el patrón arquitectónico, los soportes para tubos se tomaron del encofrado de la hoja interior. Estas tuberías admiten una rejilla de acero estructural siguiendo de cerca el perfil de la superficie externa de las conchas. La red apoya el encofrado exterior contra la presión del hormigón y también acomoda las plataformas de trabajo en todos los niveles. En ciertos puntos seleccionados, fueron conectadas los encofrados interiores y exteriores, para reducir la carga del encofrado y limitar la desviación del mismo.

Para asegurar que no hubiera retrasos, dada la complejidad de la construcción, los paneles interiores del encofrado fueron encajados y fijados con anterioridad a su colocación.

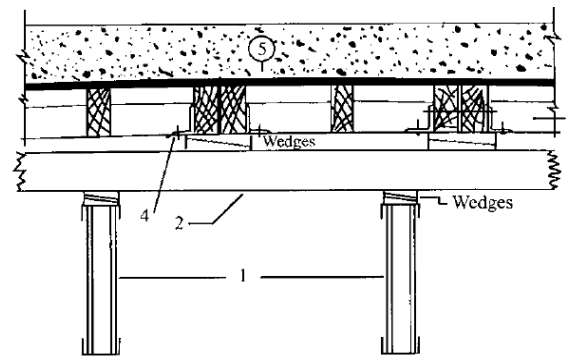


Imagen 11: Detalle del Encofrado de la Hoja de Entrada

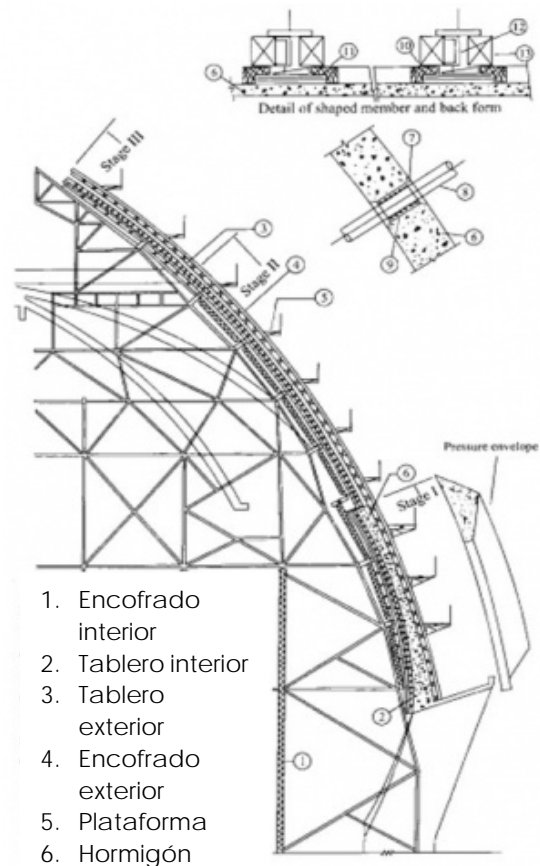


Imagen 12: Detalle y Etapas de la Hoja Interior

8. Cargas

Para el diseño de la estructura se consideraron las siguientes cargas:

1. Peso muerto de encofrado: 750 N/m² de superficie.
2. Peso muerto de los miembros de acero estructural
3. Carga viva: 2.000 N/m² en área.
4. Mayor carga muerta de hormigón o presión líquida en cualquier punto correspondiente a la tasa de colocación 0,45 m/hr y mínimo de la temperatura de 10°C (en invierno). La presión se calculó según la publicación ACI-SP.4: $p = 7,2 + [(785R) / (T_c + 17,8)]P$.
5. Presión básica del viento: 1.000 N/m².

Para la hoja interior, se consideraron varias combinaciones de las cargas anteriores siguiendo las siguientes consideraciones:

Etapa I: Hormigón desde la parte superior del arco hasta +24,8 m.

Etapa II: Hormigón desde +24,8 m hasta +38 m.

Etapa III: Hormigón desde +38 m hasta la parte superior.

Las combinaciones de cargas fueron:

1. Peso propio de la estructura espacial (simétrico)
2. Carga viva + peso muerto de la etapa I (asimétrico)
3. Carga viva + peso muerto de la etapa I (simétrico)
4. Carga viva + peso muerto de la etapa II (asimétrico)
5. Carga viva + peso muerto de la etapa II (simétrico)
6. Carga viva + peso muerto de la etapa III (asimétrico)
7. Carga viva + peso muerto de la etapa III (simétrico)
8. Presión del viento + carga de altura completa (asimétrica)

Basado en las cargas anteriores, se realizó un cálculo de todas las combinaciones posibles utilizando el programa SAP2000 v14. Se utilizó el mismo modelo de cargas tanto para las cáscaras exteriores como para las interiores.

9. Refuerzo

El refuerzo utilizado en las cáscaras de hormigón blanco, así como los cables de enlace fue totalmente galvanizado con el fin de evitar el efecto a largo plazo de corrosión de armaduras en el hormigón blanco. Puesto que rara vez se utiliza refuerzo galvanizado para hormigón en ese país, se tuvieron que llevar a cabo diferentes pruebas para garantizar que las propiedades mecánicas de refuerzo no fueran perjudiciales debido a la galvanización. También se empleó un chorro de arena para reducir el tiempo de decapado con el fin de evitar la fragilización por hidrógeno.

Al realizarse primeramente el encofrado de la parte inferior de cada superficie, y siendo que las líneas de borde y el mismo encobrado fueron tomados como maqueta, se decidió que longitud y forma debería tener cada una de las barras de refuerzo de las cáscaras.

Para evitar la impresión de este refuerzo en la cara inferior, se utilizaron espaciadores de acero especiales apoyados en los encofrados, manteniendo en posición la capa de refuerzo.

10. Hormigón

Todas las costillas y conchas están realizadas en hormigón blanco. Para evitar grietas y fisuras, se utilizó una mezcla de hormigón blanco M30, teniendo en cuenta que el contenido de cemento debe estar por debajo de 500 kg/m³ y la cantidad de agua reducida al máximo para facilitar su colocación.

Diferentes pruebas realizadas con el cemento indio revelaron que la resistencia y otras características variaban considerablemente y el color no cumplía el requisito arquitectónico. Mezclas de ensayo también demostraron un mayor requerimiento de cemento de 435-450 kg/m³. La cantidad entera de cemento blanco por lo tanto fue importada de Corea. Con el cemento importado, fue posible producir hormigón que a los 28 días tuviera una fuerza de 55-60 N/mm² con un contenido de cemento de 380 a 400 Kg/m³.

Una mezcla de 1:1,44:3,36 y la relación W/c de 0,42 fue adoptada finalmente.

Para lograr una alta trabajabilidad, con una depresión 1-120, se utilizaron súper plastificantes: 0,5 a 75% por peso de cemento.

Además, fueron procurados agregados de dolomita especialmente calificados de las minas de Alwar, cerca de Delhi y arena blanca de Jaipur.

La temperatura máxima del hormigón en el momento de colocación fue limitada a 30°C. Durante los meses de verano, cuando la temperatura ambiente alcanzaba los 45°C, la temperatura del hormigón fue controlada mediante la adición de una cantidad medida de hielo y por la pre-refrigeración de áridos en contenedores de almacenamiento refrigerado de agregado.

Para evitar juntas frías debido a la paralización del trabajo durante las fuertes lluvias, como también para proteger el agua de lluvia en las formas, toda la zona de hormigonado estaba cubierta por lonas.

Después de la eliminación de las marcas externas, la superficie del hormigón fue cubierta con arpillera y curada durante 28 días manteniéndolo húmedo continuamente por un arreglo de rociadores fijado en la parte superior de las conchas.

11. Ensayos y Maquetas

Las cáscaras de la cúpula interior fueron inicialmente de 50mm de espesor y propusieron ser construidas mediante gunitado in situ. Para ello se realizaron maquetas a gran escala para estudiar los problemas de espacio y accesibilidad. Finalmente se consideró que, debido al espacio limitado disponible entre las cáscaras, las condiciones de trabajo para operaciones de gunitado serían difíciles.

Como alternativa, se propuso que las cáscaras se construirían en hormigón in situ mediante encofrado en ambas caras. Teniendo en cuenta que cada superficie tuvo que ser realizada en una sola aplicación, la fijación de los encofrados y de la armadura, así como la colocación y compactación del hormigón entre dos caras del encofrado de sólo 60mm, plantearía graves problemas.

Tanto la dificultad de alinear las diferentes partes del encofrado para producir exactamente la superficie compleja, doblemente curvada y las intersecciones del mismo, así como la cercanía de los pétalos, causó graves problemas de espacio de trabajo para fijar el encofrado, refuerzo y hormigonado.

12. Aseguramiento de la Calidad

Basado en la secuencia de construcción prevista, las hipótesis formuladas en el diseño de los encofrados, los procedimientos desarrollados de maquetas y los ensayos realizados en materiales, se establecieron multitud de declaraciones detalladas del método y criterios de aceptación.

La comprobación de la ejecución se realizó en cada etapa para producir la calidad y precisión y también para asegurar que no había ninguna desviación de las condiciones de la carga asumida en el diseño de los encofrados.

Un completo laboratorio concreto llevó a cabo diseños de mezcla para los diferentes grados de hormigón y ejerció un control estricto sobre la calidad del concreto.

13. Revestimiento de Mármol

La superficie externa de las conchas, como también la superficie interna de los arcos, están revestidas con paneles de mármol blanco, fijado a la superficie de hormigón con abrazaderas de acero inoxidable especialmente diseñadas y anclajes. Se trata de 10.000 metros cuadrados de mármol extraído de la mina Pentilekon de Grecia, enviado posteriormente a Italia, donde cada panel es cortado hasta el tamaño requerido, para adaptarse a la geometría y patrón arquitectónico antes de transportarlo a Delhi.

Después de la impermeabilización de la superficie superior, se utilizaron plantillas de madera del mismo tamaño a los paneles de mármol para definir la ubicación exacta de cada uno con anterioridad. La geometría de las líneas de borde y cúspide, fue comprobada con precisión con respecto a estos paneles, y las piezas de mármol fueron fijados en la posición correcta de abajo hacia arriba. Se perforaron agujeros de borde para cada panel de mármol antes de que los paneles se colocaran en posición. Estos agujeros fueron perforados en el hormigón para acomodar los tornillos de anclaje de los soportes de acero inoxidable de cada pieza de mármol. Después de la fijación de los soportes, el área alrededor del agujero del soporte fue sellada con un compuesto especial de impermeabilización.

La alineación de los paneles se ajustó en cada capa para que se mantuvieran las líneas superficiales de geometría y patrón. Las piezas cerca de borde y cúspide fueron cortadas in situ para adaptarse a las líneas de límite.

Entre cada una de las piezas de mármol se dejaron entre 8 y 10mm de separación, rellenas con un cordón de caucho moldeado. Sin embargo, la parte superior de las articulaciones, así como los agujeros de fijación, fueron sellados con un sellador de base de silicona.

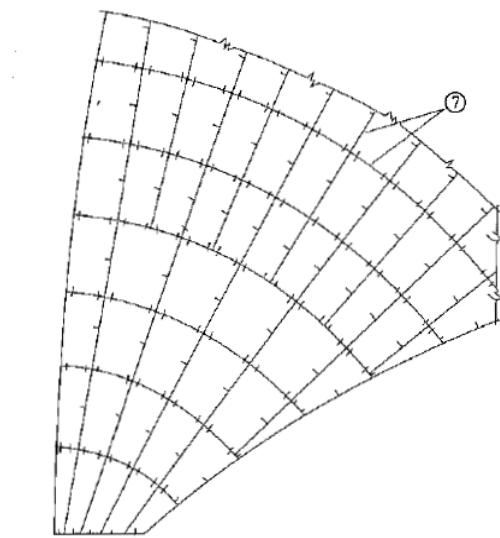


Imagen 13: Detalle de colocación del mármol

Toda la superficie de mármol fue, por último, lavada con una solución de ácido muriático al 30% mezclado en agua, para eliminar la suciedad y las manchas.

Fue diseñado un andamio de acero estructural especialmente diseñado para las diferentes curvaturas, así como para la capacidad de acceso y movilidad de la plataforma. Estas plataformas estaban separadas de la superficie de las cáscaras para que la fijación del mármol pudiera llevarse a cabo sin ningún obstáculo de los soportes.

Extraordinariamente, toda esta obra realizada con el mármol, fue realizada por carpinteros que aprendieron dicha habilidad en escasas semanas, siendo capaces de completar el trabajo, a la exactitud requerida, dos meses antes de la hora de finalización programada.

14. Gestión de Proyectos

La complejidad de la estructura y los altos niveles de mano de obra esperada, exigen una gestión dinámica de la construcción, con un alto grado de

innovación, espíritu de equipo y sentido de la calidad por parte de los trabajadores y del personal.

Se requiere una alta capacidad de anticipación de problemas y de resolución a través de ensayos y maquetas, siendo una parte esencial de la planificación. Además, se hizo gran hincapié en la terminación del proyecto dentro del tiempo estipulado y costo, planificando y monitorizando los recursos constantemente a través de la revisión de las redes PERT/CPM de organización.

Modelizado

Una vez estudiado el templo, comenzaremos a modelizar la estructura mediante el programa AutoCad.

Para ello, primeramente, debemos analizar cómo es la estructura y de qué manera funciona, realizando los ajustes y simplificaciones pertinentes.

En nuestro caso, no podemos tomar las superficies como cáscaras de canto variable, ya que su modelización resultaría extremadamente complicada e imposible de calcular mediante el programa. Deberemos resolver todas las cáscaras como superficies o 3Dcaras.

A su vez, en el caso de las costillas estructurales, deberemos modelizarlas también, puesto que no se podría calcular una serie de curvas complejas sin previamente seccionarla. Para ello, tomaremos como simplificación la ejecución de costillas en los vértices de las superficies, obteniendo en este caso áreas bordeadas completamente por estas líneas exteriores.

Al tratarse de 3dcaras, deberemos tener diversas consideraciones:

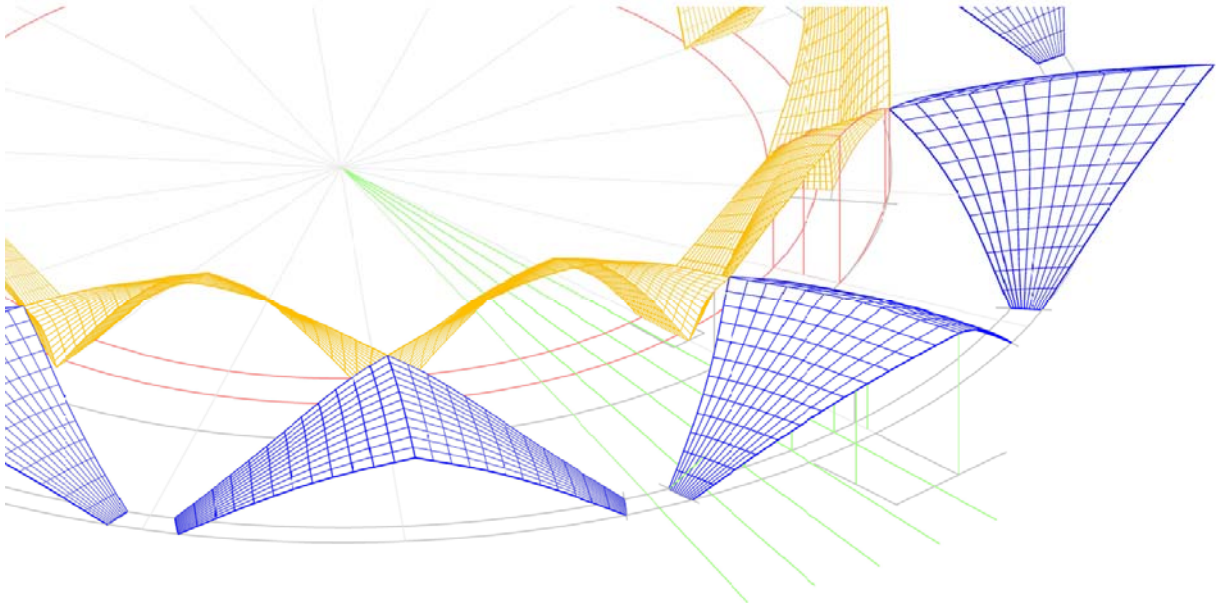
1. No podrán tener ángulos demasiado pequeños ni excesivamente grandes.
2. No podrán tener diferencias muy grandes entre sus lados, con una proporción no mayor a 4.
3. Es mejor generar 3Dcaras rectangulares o cuadradas, ya que facilitará el cálculo posterior.
4. Todo vértice deberá conectarse con otro vértice de 3Dcara o bien de una línea.
5. El orden de dibujo condiciona la normal de la superficie creada, por lo que tendremos que seguir la regla de la mano derecha.
6. Todas las normales de una superficie deberán presentar sus normales en el mismo sentido.

Para la modelización de las costillas ya nombradas, tendremos también ciertas consideraciones que seguir. Al tratarse de un elemento curvo, tendremos que discretizarlo en diferentes tramos rectos. Además, al tratarse de elementos unidos a una superficie, deberemos hacer coincidir esos tramos rectos con los diferentes tramos de las 3Dcaras, por lo que dependeremos de la cantidad de superficies que creemos para generar más o menos tramos rectos de borde.

Para aumentar el nivel de detalle en los resultados, debemos en este paso, aumentar la cantidad de 3Dcara generadas, ya que de esto dependerá la calidad de detalle. Esto conlleva el aumento de elementos finitos y de líneas de que estará formado el modelo, aumentando su peso y el tiempo de cálculo del programa.

Por ello deberemos valorar hasta qué punto es necesario aumentar la definición y la cantidad de subdivisiones y cuándo debemos disminuirlas para no sobrepasar la capacidad del modelo.

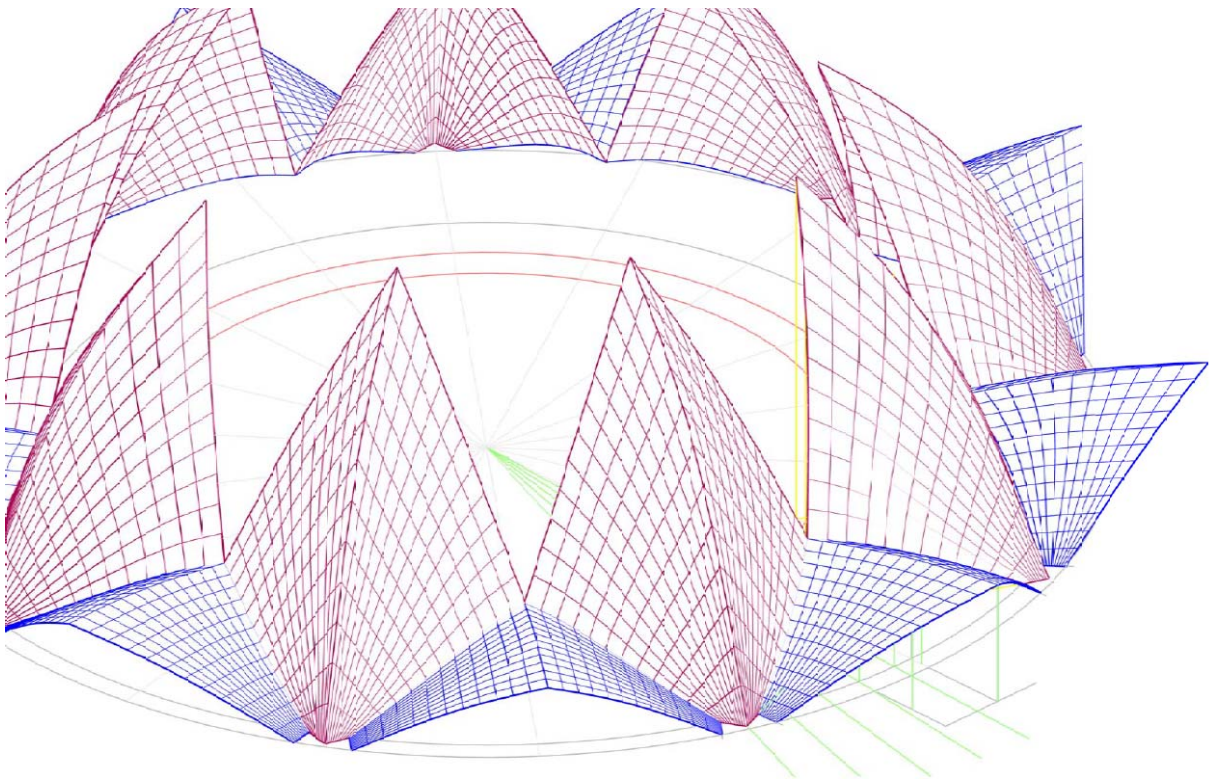
Modelizado Hoja Entrada y Arcos



En color azul podemos ver el modelizado de las Hojas de Entrada junto con las líneas auxiliares empleadas para ello. En amarillo, se han realizado los Arcos de acceso a la nave principal.

Ambas están modeladas, como hemos dicho anteriormente, mediante 3Dcara y líneas exteriores que unan los diferentes vértices, con un grado de detalle y subdivisión que nos permite definir correctamente las diferentes curvas sin que sature el modelo.

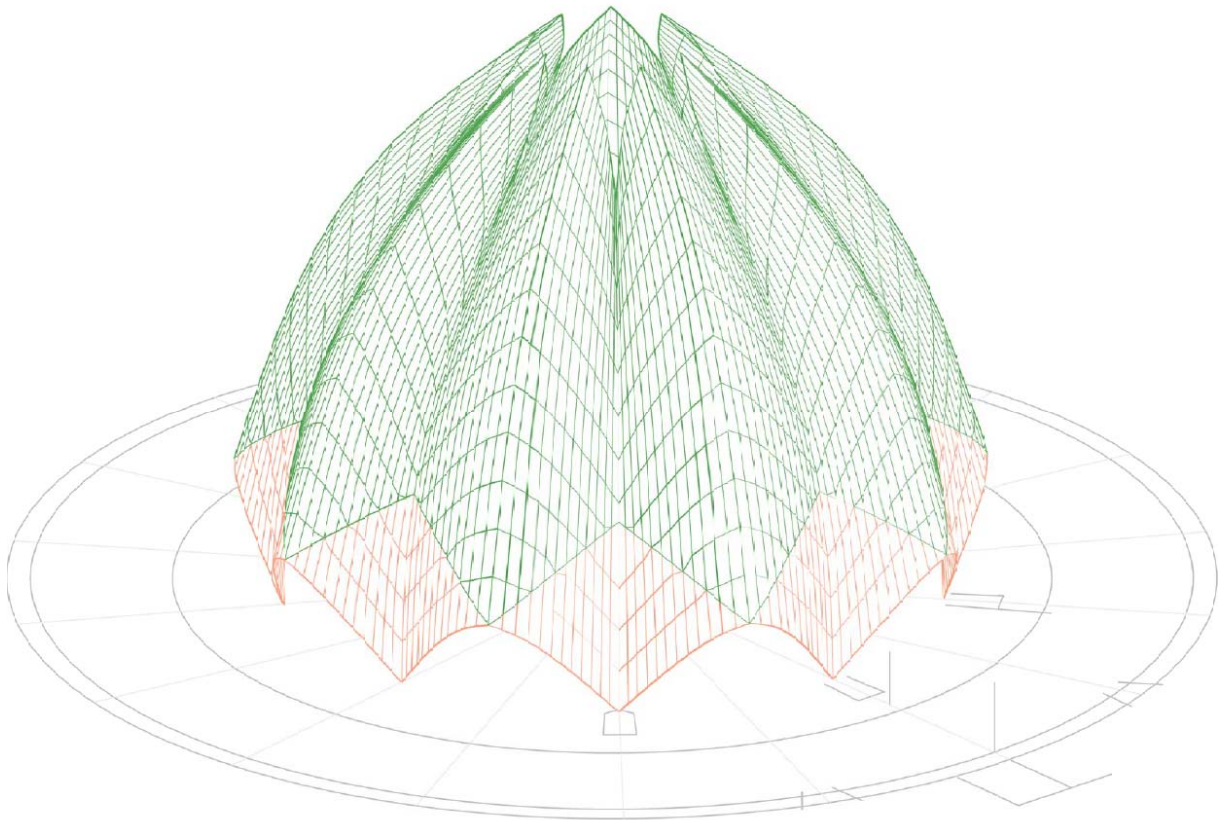
_ Modelizado Hoja Entrada y Hoja Exterior



Después de modelizar las hojas de entrada y los arcos, pasamos a generar las Hojas Exteriores, en este caso en color rojo. Para ello nos apoyaremos en las ya trazadas hojas de entrada, subiendo posteriormente hasta alcanzar la altura deseada con la curvatura descrita al inicio de este documento.

Hay que tener en cuenta en este paso que, tanto las 3Dcara como las líneas de esta nueva carcasa, deben coincidir con las de la capa en la que apoyan, para que se transmitan las cargas correctamente de unas a otras.

_ Modelizado Hoja Superior

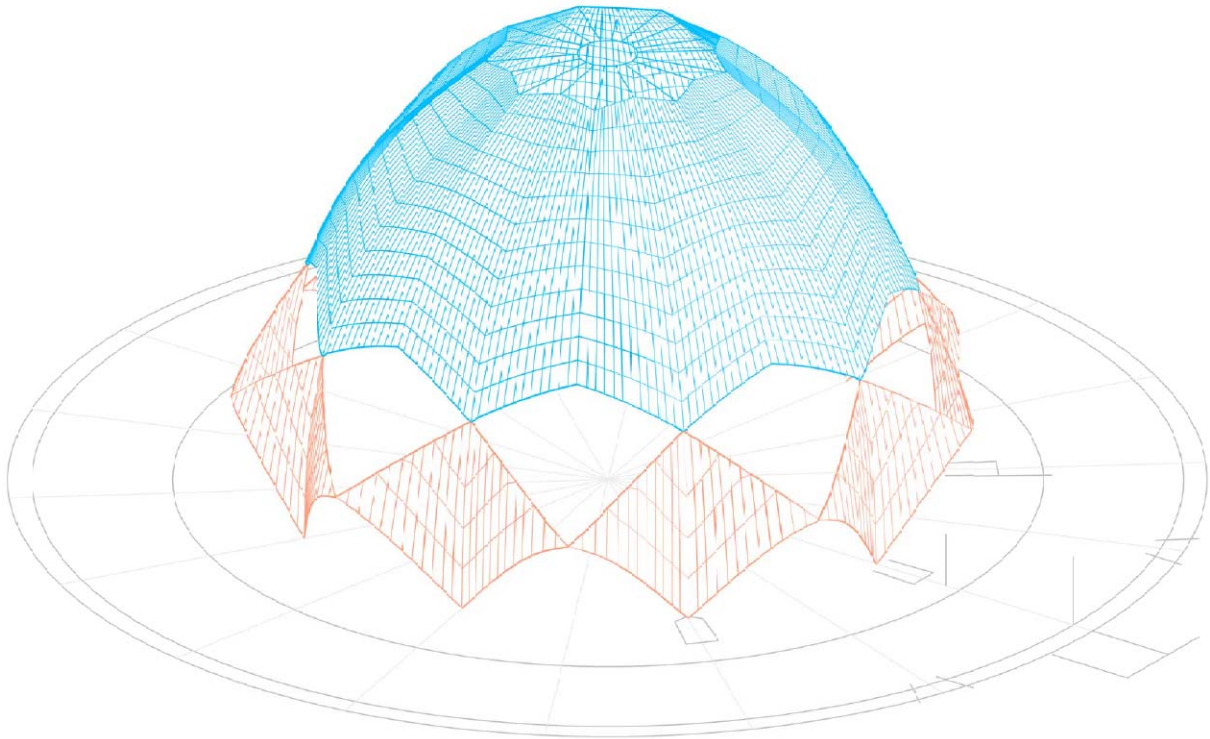


Para el modelizado de las Hojas Superiores deberemos partir de las superficies ya generadas de los arcos.

En este caso, una vez hayamos constituido las líneas principales sobre las que se apoyarán las 3Dcara, tendremos que crear una división donde irán las costillas en las que se apoyará la cúpula interior.

De esta forma estaremos generando dos superficies distintas, pero vinculadas entre ellas de la misma forma que hemos nombrado en el anterior apartado, haciendo coincidir los vértices tanto de las 3Dcara como de las líneas.

_ Modelizado Cúpula Superior

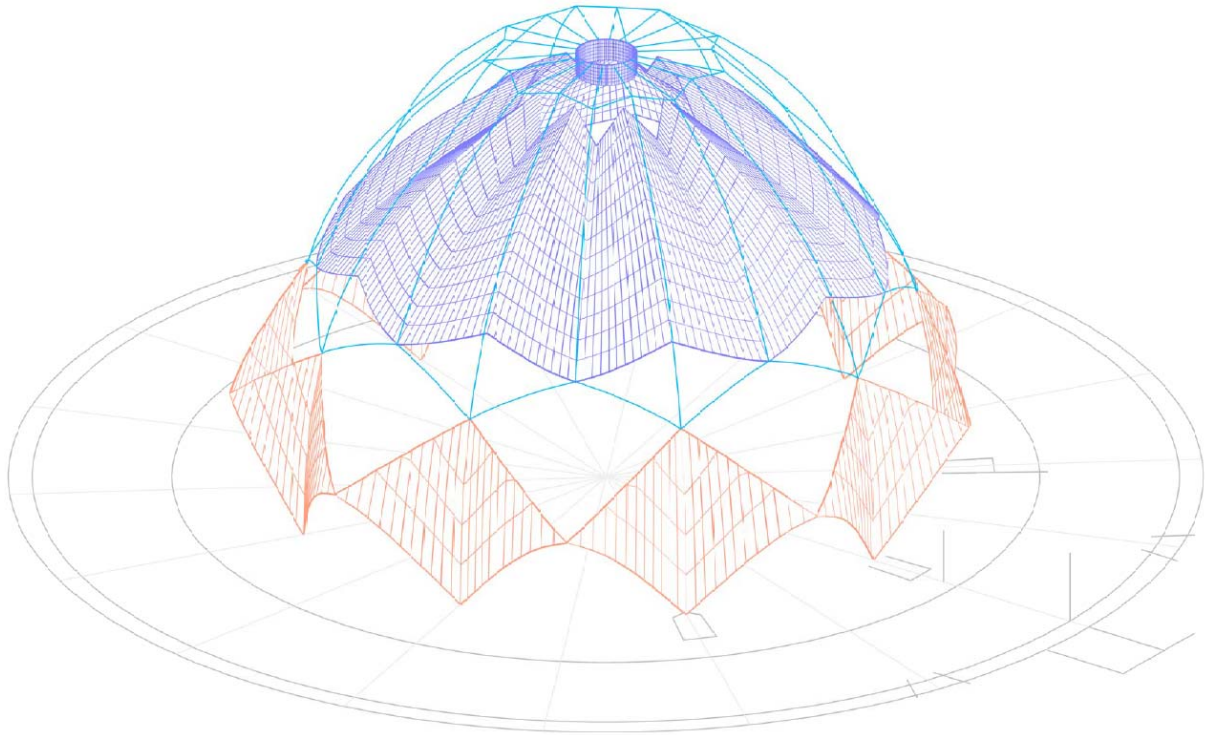


Para el levantamiento de la cúpula interior, actuaremos en dos partes.

Primeramente, generaremos la parte superior de la cúpula, situada directamente bajo la Hoja Superior que acabamos de modelar. Para ello partiremos de los vértices de las áreas que hemos subdividido en el apartado anterior. A partir de estos puntos, crearemos las curvas directrices de las costillas que llegan hasta el centro.

Al llegar a la altura deseada de proyecto, estas costillas pasarán a generar, casi horizontalmente, la parte superior del lucernario central, que después pasaremos a vincular con la parte inferior de esta cúpula.

_ Modelizado Cúpula Inferior

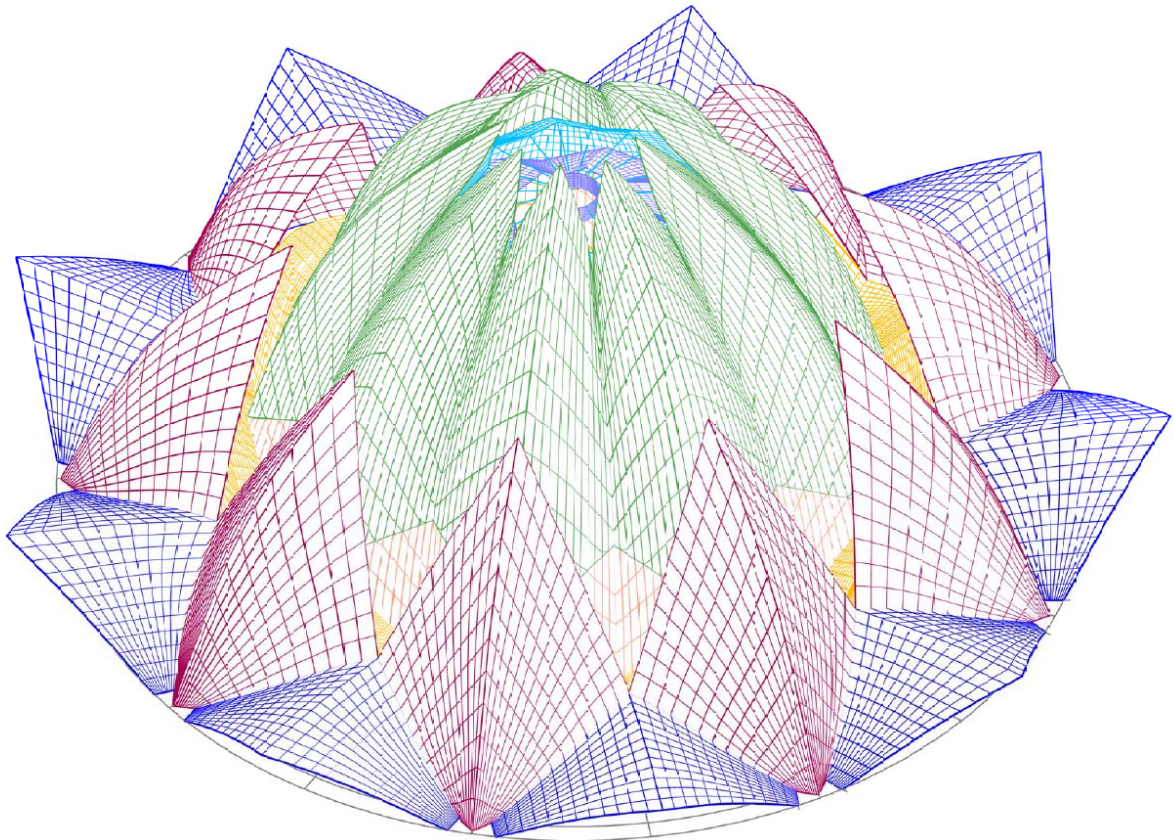


Una vez hayamos realizado la parte superior de la cúpula, podremos comenzar con la inferior.

Para ello, esta vez, partiremos del nuevo vértice generado en el anterior apartado. A partir de este punto actuaremos de manera semejante a la parte superior. Generaremos las curvas de las costillas que soportan las diferentes superficies hasta llegar al lucernario central. Desde ese punto, continuarán exclusivamente estas costillas, las cuales terminarán de ejecutar el lucernario central.

Una vez terminado este proceso, la cúpula interior estará terminada, habiendo creado la trama de superficies y huecos tan característica de este templo.

_ Modelo General



Una vez acabado el modelo y tras todas las consideraciones y precauciones tomadas, en cuanto a tamaño y vínculos tanto de las 3Dcara como de las líneas, podemos observar como cada una de las capas y superficies están directamente relacionadas unas con otras. De esta manera, si no se actuara con precaución y centrándonos en el detalle de todos los vértices, al llegar al cálculo del templo, generaríamos unos resultados apartados de la realidad y sin ninguna relevancia.

Una vez llegado a este punto, pasaremos al estudio de cargas y de la materialización de los elementos, pasando ya al programa SAP2000.

Materialización y Cargas Aplicables

Una vez completado el modelado del Templo, es el momento de pasar al programa de cálculo.

Para ello debemos colocar cada una de las diferentes superficies, así como de las líneas vinculadas a ellos, en capas distintas. Cada una de estas capas debemos importarla al programa una a una y situarlas en el ámbito correcto. Con esto me refiero a que cada capa de superficie debe estar incluida e importada en el apartado de superficies.

Esta diferenciación por capas la realizaremos por razones de comodidad y sencillez en el momento de ver y extraer los resultados, ya que de este modo podemos separar cada una de estas capas observando qué ocurre específicamente en ellas. En el caso de haber importado todas ellas a la vez, resultaría una tarea tediosa seleccionar todas las pequeñas 3Dcaras que incluye cada conjunto, viendo exclusivamente los resultados del modelo global.

1. Adjudicación de Materiales y Ajuste de Colocación

Una vez hemos importado el modelo al programa vamos a pasar a adjudicarle a cada superficie y a cada línea el material y la sección correspondiente para su cálculo.

En este caso, el material escogido en la realidad, y el que tomaremos para el cálculo, no serán exactamente el mismo dada la dificultad de obtenerlo en datos para el programa, ya que se trata de un hormigón especial realizado en la India. Por este motivo, emplearemos el hormigón más cercano a él, incluido en la norma española. El hormigón empleado es un hormigón HA-30, con el que nos acercaremos lo máximo posible a los resultados reales.

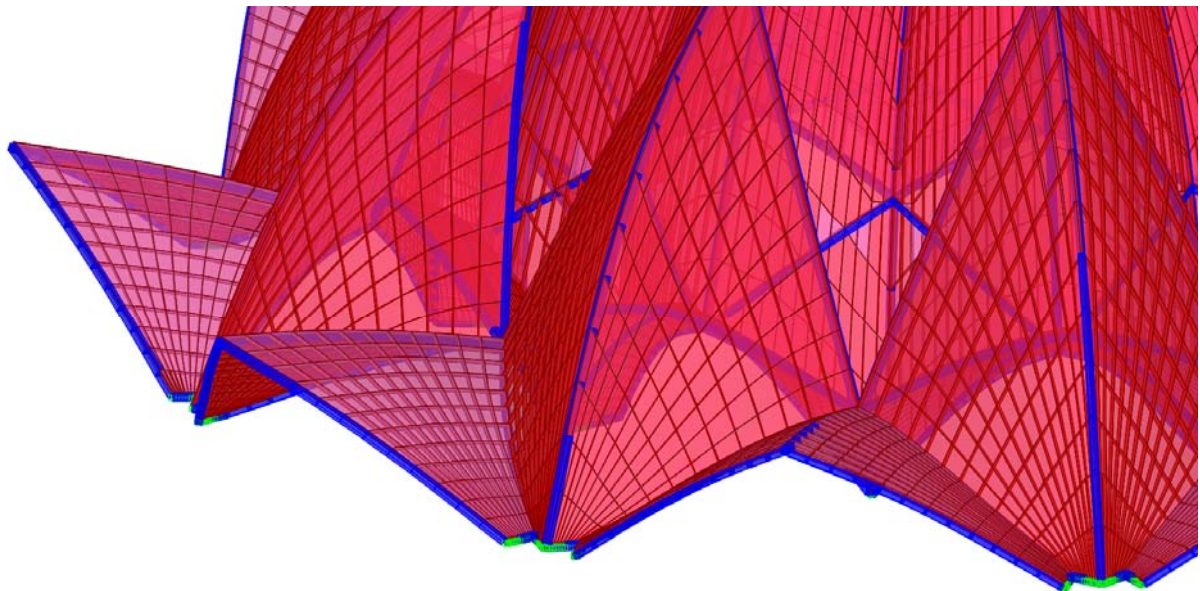
Como hemos comentado anteriormente, en cuanto a las secciones que emplearemos para el cálculo estructural, tomaremos una simplificación de la realidad para llevarla al modelo de cálculo. De esta forma tomaremos las costillas como secciones de 30 x 30 cm y las superficies como losas de 20 cm de espesor.

Una vez determinado el material y las secciones, debemos ajustar el punto de inserción de cada una de estas secciones. Al determinar las diferentes secciones, éstas se insertan en el eje de la misma, de forma que podemos llegar a resultados diferentes a la realidad, ya que actuará de diferente manera si la superficie está vinculada a la costilla en la parte superior o en la inferior.

En el caso de nuestro edificio, este aspecto tiene poca relevancia, ya que se trata de elementos de gran longitud, pero de poco espesor, por lo que no variará en gran medida el punto en el que los insertemos, ya que como máximo existirá una diferencia de 30 cm entre la parte superior de la costilla y la inferior.

A pesar de esto, optaremos por colocar las superficies por encima de las costillas, ya que constructivamente se asemeja en mayor medida a la realidad. Colocándolos de este modo, obtenemos una superficie exterior continua sin interferencias de estas costillas.

Respecto a la unión con el suelo, optaremos por un soporte completamente fijo, empotrado. Esta opción es la más adecuada y semejante a la ejecución, ya que, a pesar de existir un sótano en la realidad, éste actúa como un empotramiento.



2. Asignación de Cargas

En este modelo, en cuanto a la asignación de las cargas, tendremos cuatro tipos de cargas.

— Peso propio

En primer lugar, tenemos el peso propio de los elementos definidos. Este peso dependerá tanto de la sección que hemos asignado como del material por el que hemos optado.

En este caso, no debemos asignar esta carga manualmente, ya que es el programa el que la determina automáticamente en el sentido de la gravedad.

_ Sobrecarga de Uso

Según lo estudiado y nombrado anteriormente, para el cálculo del edificio, se empleó una carga viva de 2.000 N/m² sobre todas las áreas de la cubierta.

Esta carga se debe a la posible sobrecarga que se daría para ejecutar las reparaciones necesarias. Al tratarse de unas reparaciones complejas y que necesitarán una gran plataforma para ello, este valor es algo más elevado de lo normal en otro tipo de edificios.

Esta carga de 2.000 N/m² la colocaremos pues, en todas las 3Dcaras de nuestra cubierta, en sentido negativo del eje Z global, es decir, en el mismo que la carga anteriormente descrita.

_ Peso Muerto del Mármol

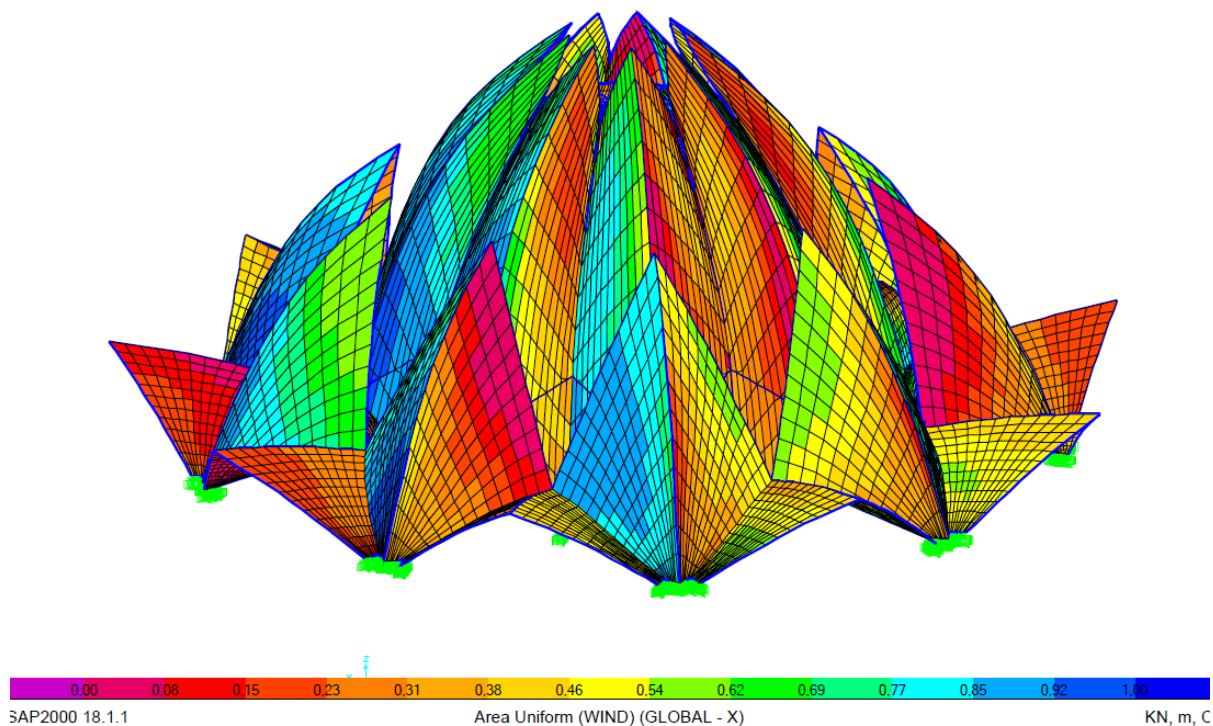
En este caso específico, obtendremos nosotros el peso muerto del mármol de las tablas del CTE así como de las características propias de peso específico del mismo. Esto se debe a que este peso muerto, en el momento de su diseño, se añadió al peso propio de la estructura de hormigón, por lo que no sabemos exactamente el valor que se empleó.

Por este motivo, y tras obtener el valor, emplearemos una carga de 800 N/m² en todas las superficies de la estructura. Este valor incluye tanto el mármol como las diferentes guías para su correcta colocación. La carga estará colocada en la misma dirección que las anteriores, en el eje Z negativo.

_ Acción del Viento

La acción del viento en el Templo es un poco más compleja que las anteriores, ya que se trata de una cubierta completamente curvada y en todas las direcciones.

Por este motivo, emplearemos los 2 KN/m² que se emplearon en su cálculo original relacionados con esta acción del viento. Sin embargo, esta vez y como se trata de un edificio simétrico en las direcciones al ser radial, únicamente lo estudiaremos en una de las direcciones. Por ello aplicaremos esta carga en la proyección del eje X. Al aplicarlo de esta manera conseguimos que el reparto de la carga se asemeje lo máximo posible a la realidad, pero simplificada para el cálculo.



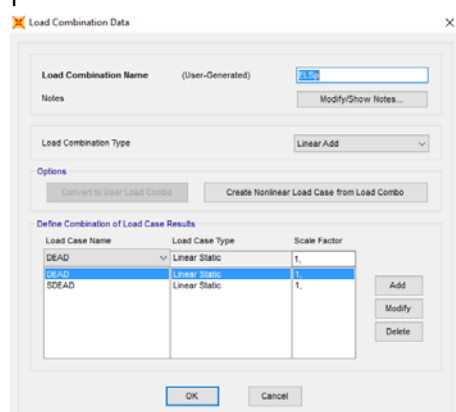
3. Combinaciones de Cálculo

Una vez conocidas las cargas y aplicadas, pasaremos a estudiar las diferentes combinaciones.

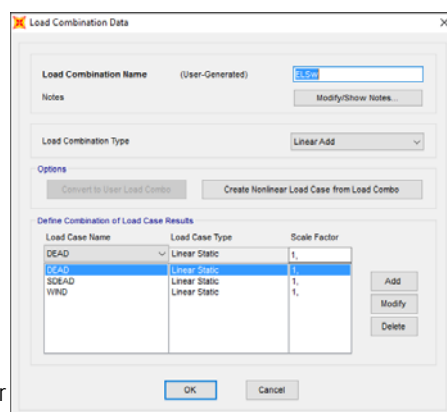
En el estudio de las combinaciones para Estados Limite de Servicio, tendremos dos casos diferentes.

El primero, **ELSp**, consistirá en la combinación de las cargas permanentes, así como el peso propio de la estructura. Ambas si mayorar. En este caso, podremos ver la repercusión del peso permanente sobre la estructura, sin la actuación ni del viento ni de la sobrecarga de uso.

El segundo de los casos, **ELSw**, consistirá en la combinación de las cargas permanentes ya mencionadas, más el efecto del viento sobre la estructura, todas sin mayorar. En este caso se observará cómo el viento afecta a la cubierta en la dirección estudiada, sin la mayoración que emplearemos con posterioridad.



ELSp a calcular



ELSw a calcular

Por otro lado, estudiaremos los Estados Límite Últimos, en el que únicamente tendremos un caso.

En este caso, **ELU**, obtendremos los resultados más desfavorables y por lo tanto los que emplearemos para la valoración de la estructura. En este caso se emplearán tanto las cargas permanentes como la acción del viento, todas ellas mayoradas. El peso propio, así como la carga obtenida del mármol, estarán mayoradas por 1,35, al contrario que el viento, el cual estará mayorado por 1,50. En este caso no aparecerá la carga variable aplicada por las posibles acciones de reparación sobre la cubierta, ya que estaría mayorada por un valor de 0, quedando así eliminada del cálculo, pero sí tomada en cuenta.

Load Combination Data

Load Combination Name (User-Generated)

Notes

Load Combination Type

Options

Define Combination of Load Case Results

Load Case Name	Load Case Type	Scale Factor
DEAD	Linear Static	1.35
SDEAD	Linear Static	1.35
WIND	Linear Static	1.5

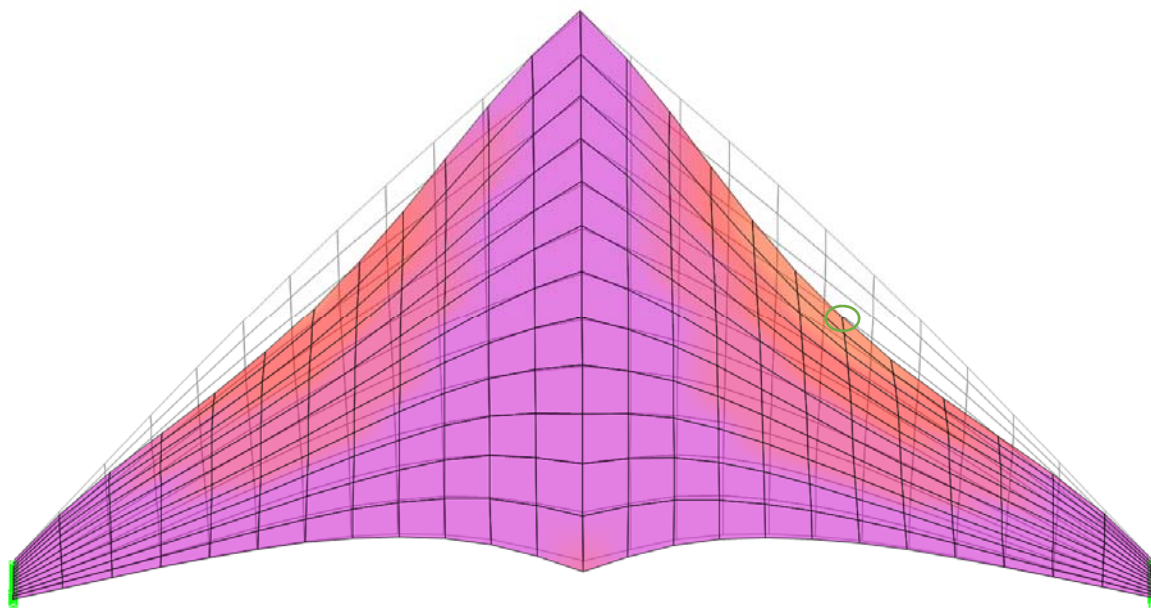
Resultados de Cálculo

1. Resultados respecto ELSp

Una vez analizadas las cargas, completado el modelo y estudiado las diferentes combinaciones, pasaremos a obtener los resultados de las mismas y a extraer de ellos las deformada.

Comenzaremos, en este caso, por la combinación ELSp en cada una de las diferentes capas, así como una visión general del modelo.

_ Deformada Hoja Entrada



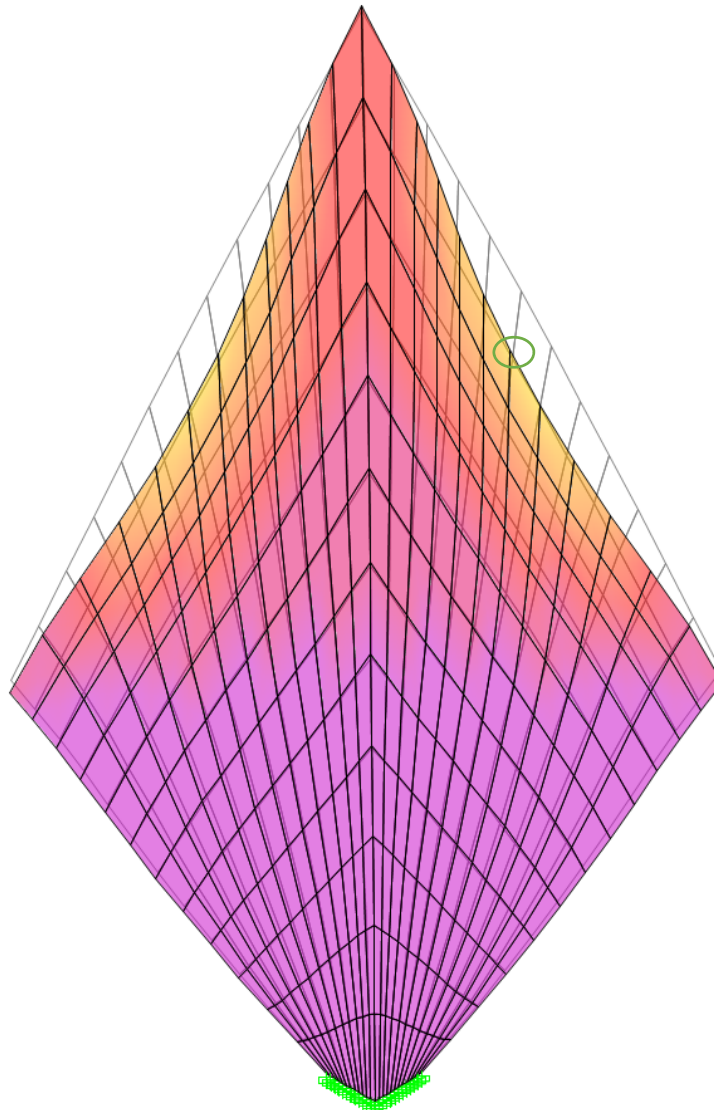
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 *Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)* 

Joint	Object	350	Joint Element	350
		1	2	3
Trans		-0,00281	2,883E-04	-0,00457
Rotn		-6,341E-04	1,049E-04	3,882E-04

Como podemos observar tanto en el modelo como en los valores de traslación del punto más afectado, en las hojas de entrada, los mayores desplazamientos se generan en la parte interior de la misma, actuando de forma simétrica en ambos lados.

_ Deformada Hoja Exterior



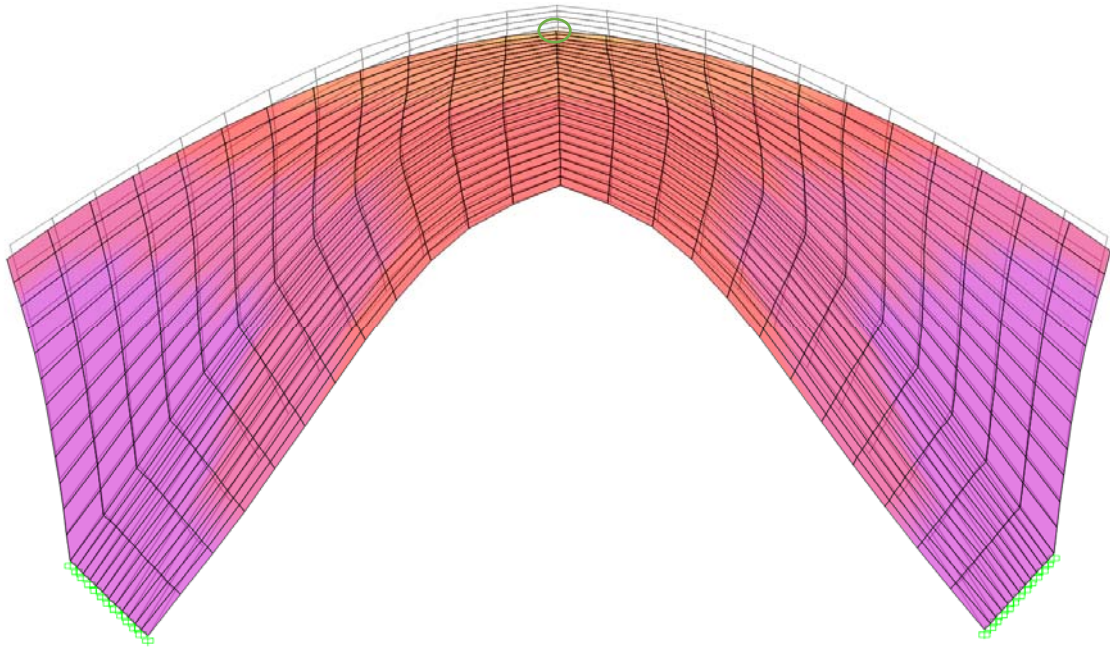
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m) 



Joint	Object	8358	Joint Element	8358
		1	2	3
Trans		-0,00637	0,00315	-0,0051
Rotn		-7,154E-04	1,735E-04	0,00111

Como podemos observar tanto en el modelo como en los valores de traslación del punto más afectado, en las hojas exteriores, los mayores desplazamientos se generan, también en la parte interior media de la misma, actuando de forma simétrica en ambos lados.

_ Deformada Arcos



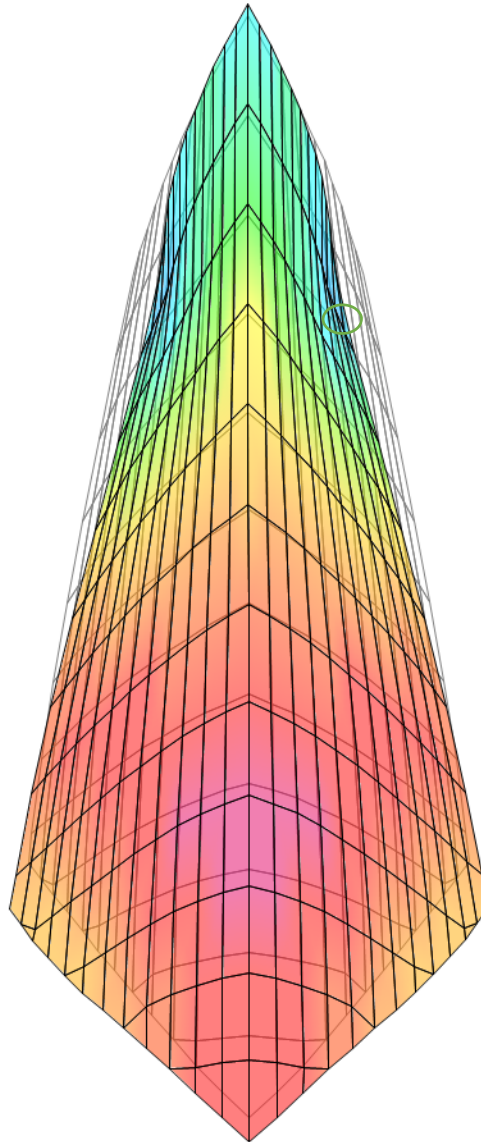
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 **Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)** 



Joint	Object	3483	Joint Element	3483
		1	2	3
Trans		6,350E-05	0,00433	-0,00391
Rotn		-0,001	1,472E-05	0,

Como podemos observar tanto en el modelo como en los valores de traslación del punto más afectado, en los arcos, los mayores desplazamientos se generan en la parte superior exterior del mismo, el punto donde se encuentran tanto los arcos con las hojas de entrada, como con las hojas exteriores. Por este motivo, ese punto recoge multitud de esfuerzos que generan estos desplazamientos.

_ Deformada Hoja Superior



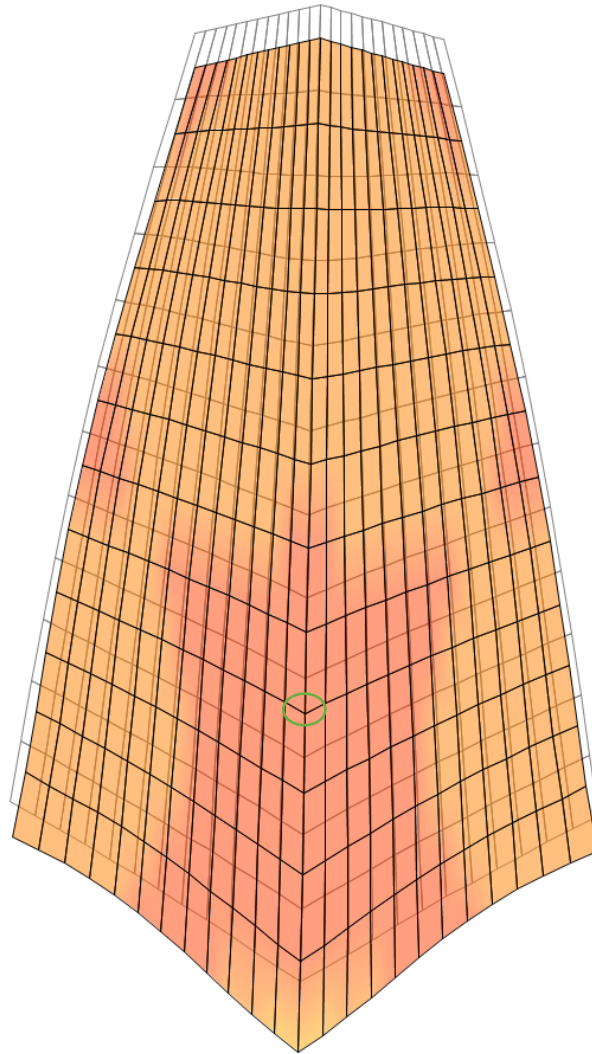
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 **Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)** 

Joint	Object	18383	Joint Element	18383
		1	2	3
Trans		-0,00753	0,00916	-0,01275
Rotn		-4,838E-04	4,944E-05	9,625E-05

En este caso, la deformada de las hojas superiores nos muestra cómo, en los extremos laterales superiores, la deformada es más acusada que en el resto de la superficie. Esto es debido al gran tamaño de estas cáscaras, las cuales tienden a cerrarse en esta parte superior. Por lo tanto, los puntos más afectados serán estos últimos enlaces con las hojas adyacentes.

_ Deformada Cúpula Superior



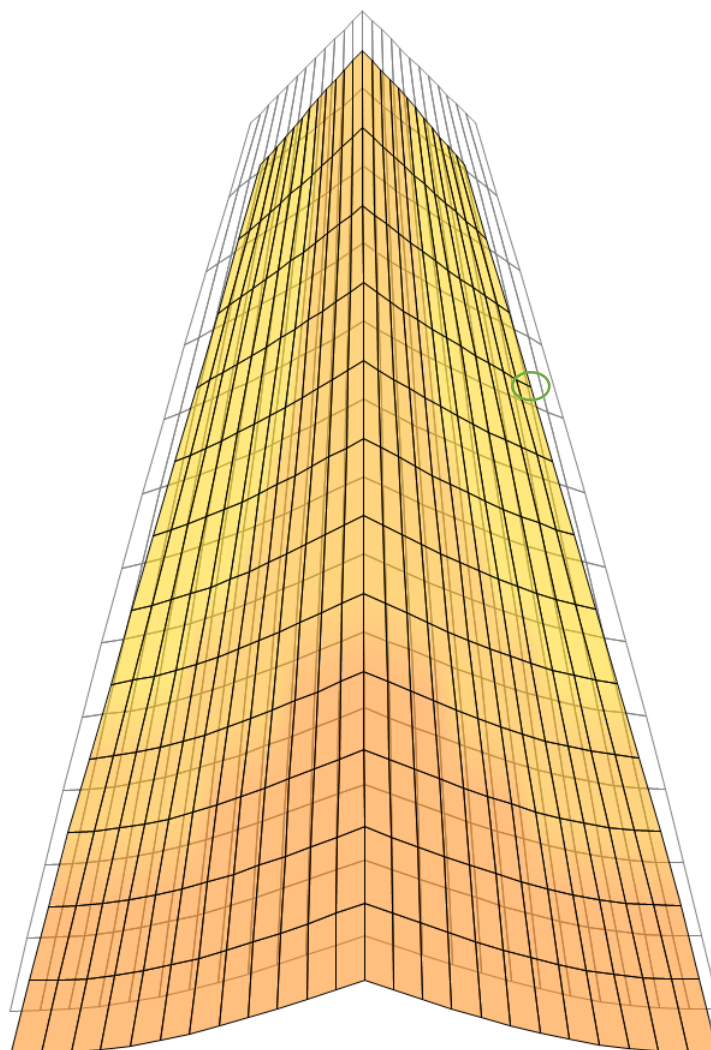
Factor de ampliación de la deformada: 200.

🔥 *Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)* ○

Joint	Object	14672	Joint Element	14672	
		1	2	3	
Trans		2,569E-04	-3,167E-04	-0,00511	
Rotn		-1,451E-04	-1,181E-04	0,	

En caso de la cúpula superior, la mayor deformada se encuentra, al contrario del resto de superficies vistas, en el centro de la misma. Esto es debido a los fuertes vínculos establecidos tanto inferiormente con las demás superficies, como superiormente mediante la gran estructura del lucernario, la cual contrarresta, en gran medida, el posible desplazamiento superior, disminuyéndolo a valores semejantes al resto.

_ Deformada Cúpula Inferior



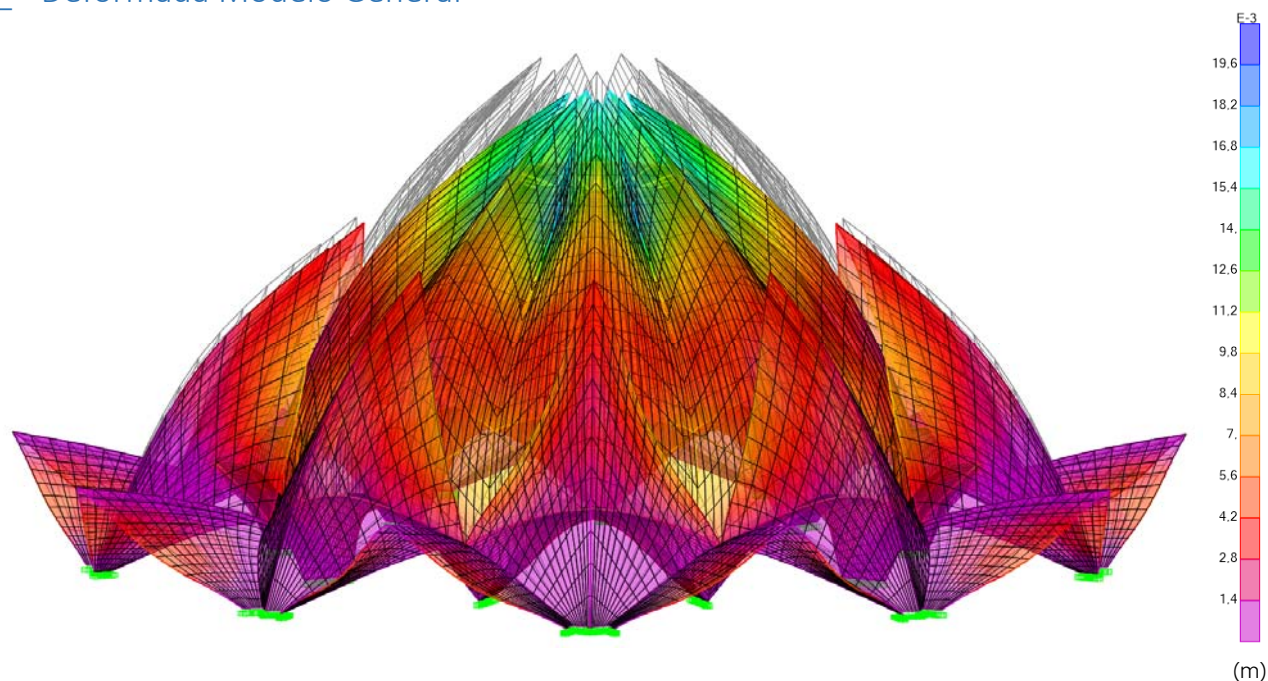
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 **Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)** 

Joint	Object	11239	Joint Element	11239	
		1	2	3	
Trans		-0,00212	0,00126	-0,00885	
Rotn		2,160E-04	3,632E-04	0,	

En caso de la cúpula inferior, al contrario que en la superior, la estructura del voladizo, a ser de mayores dimensiones, no actúa tan restrictivamente con el desplazamiento de los puntos superiores. Por este motivo, en este caso, los puntos con mayor desplazamiento se sitúan en los vértices exteriores tanto medios como superiores, ya que son los más vulnerables.

_ Deformada Modelo General



Factor de ampliación de la deformada: 200.

🔥 Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)

Joint	Object	18383	Joint Element	18383
		1	2	3
Trans		-0,00753	0,00916	-0,01275
Rotn		-4,838E-04	4,944E-05	9,625E-05

Al observar la deformada del modelo completo y después del estudio hoja a hoja, podemos determinar que, las mayores deformadas se producen en las hojas superiores, las cuales, al ser las de mayor tamaño, sufren las mayores deformaciones, como ya hemos explicado en su apartado.

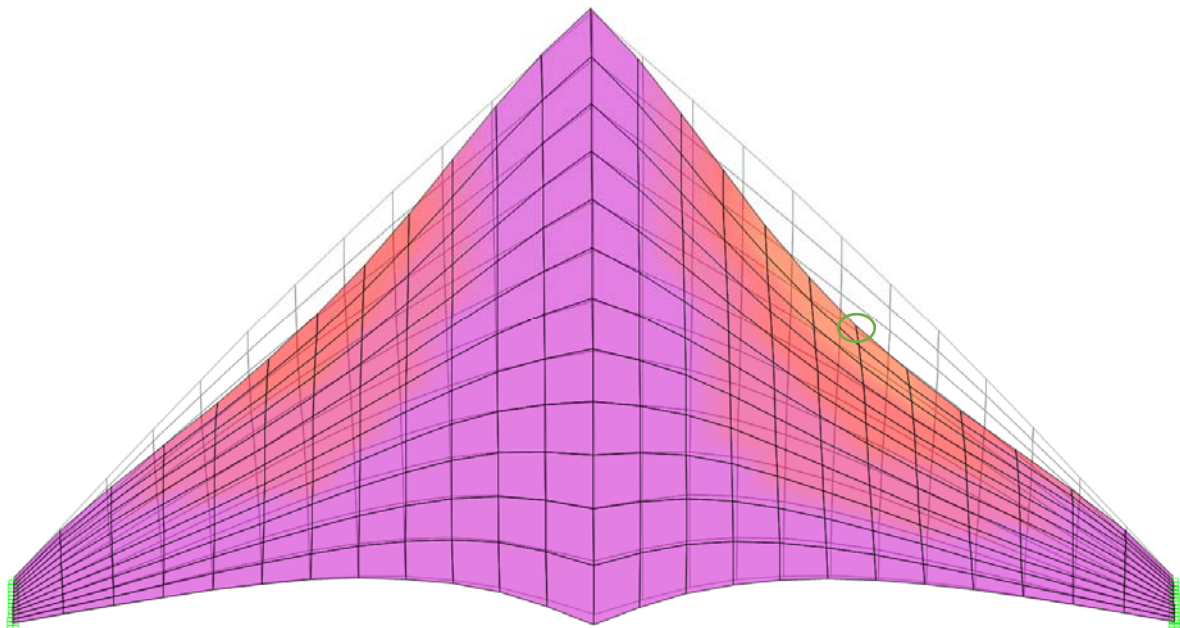
Al tratarse de una combinación excluyente del viento, las deformaciones son iguales en todas las superficies del mismo tipo, ya que las cargas aplicadas son las mismas en todas ellas.

2. Resultados respecto ELSw

Tras observar las deformadas de la combinación ELSp, pasaremos a ver el efecto que produce el viento en la estructura. Para ello continuaremos con los resultados obtenidos de la combinación ELSw.

Al incluir el efecto del viento, esta vez, la deformada deja de ser simétrica en todas las superficies individuales. Por ello tomamos los elementos más desfavorables de cada tipo de hojas.

_ Deformada Hoja Entrada



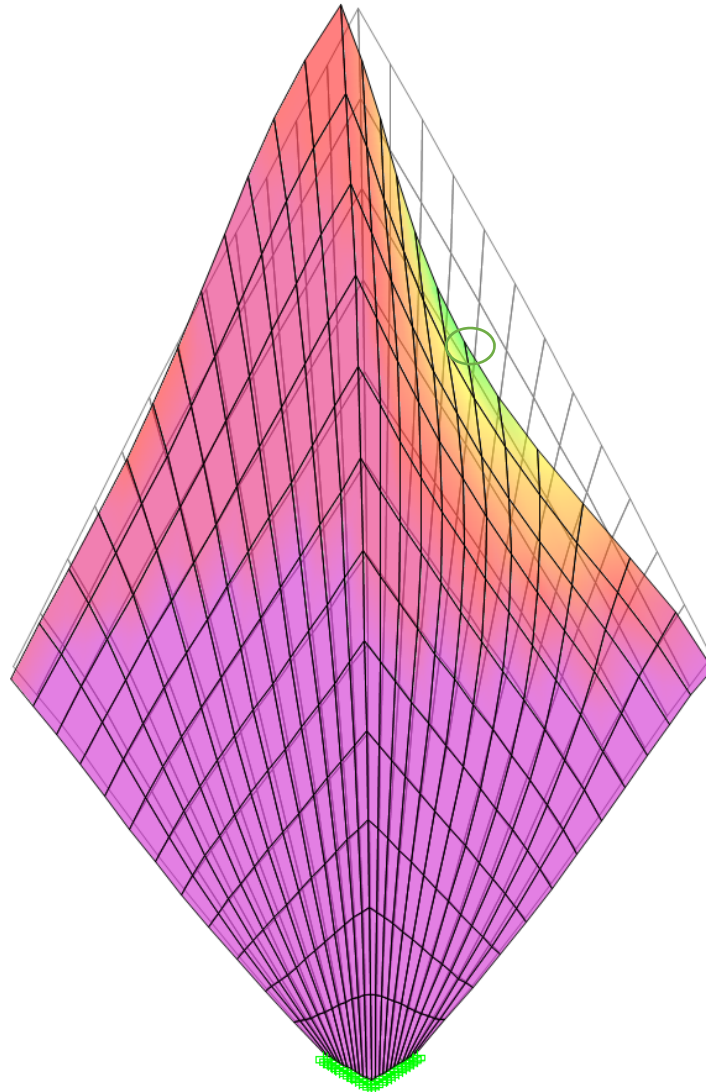
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m) 



Joint	Object	45	Joint Element	45	
		1	2	3	
Trans		0,00306	-0,00137	-0,00534	
Rotn		6,640E-04	-3,281E-04	4,579E-04	

En este caso, el punto más desfavorable se encuentra en el lado más expuesto a la acción del viento. Este factor genera, además, que en el lado opuesto se atenúe la deformada, ya que, al empujar uno de los lados horizontalmente, el otro se vea influenciado favorablemente.

_ Deformada Hoja Exterior



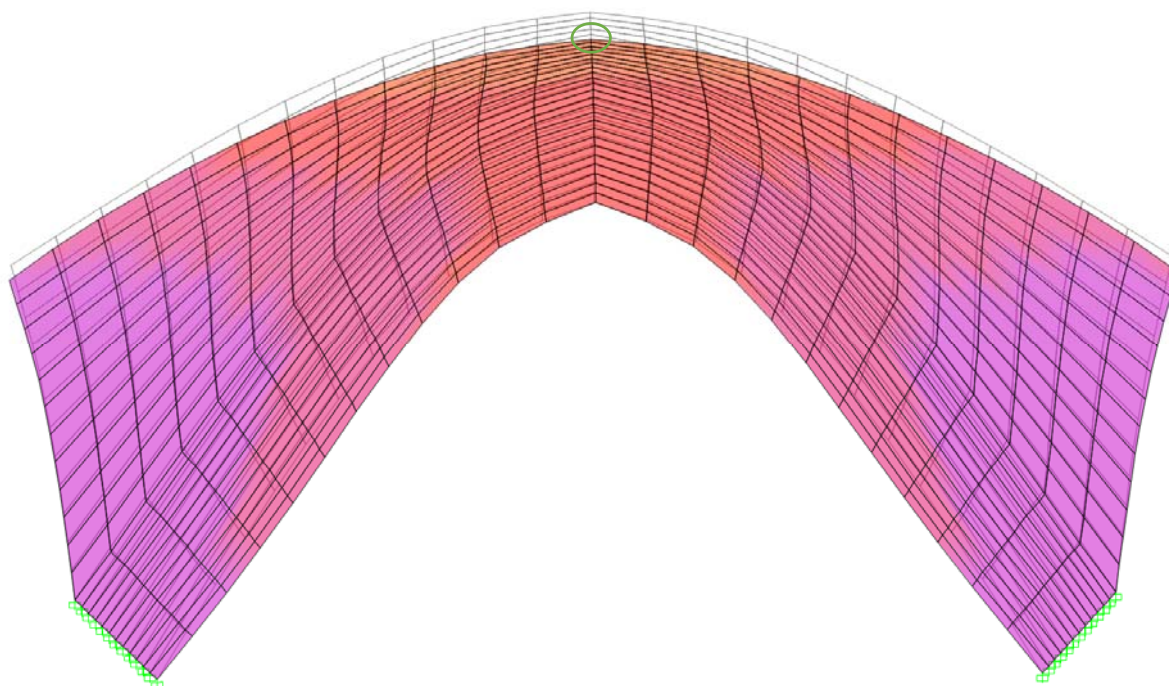
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 *Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)* 

Joint	Object	8498	Joint Element	8498	
		1	2	3	
Trans		0,00971	-0,00823	-0,00765	
Rotn		0,00115	-4,112E-04	0,00205	

Continuando con las premisas ya nombradas, las hojas exteriores son las más afectadas en este caso. Esto es debido a que son las superficies más expuestas del templo. Además, se trata de las únicas cáscaras que no están unidas en la mayoría de sus lados, lo que perjudica a la estabilidad de las mismas.

_ Deformada Arcos



Factor de ampliación de la deformada: 200.

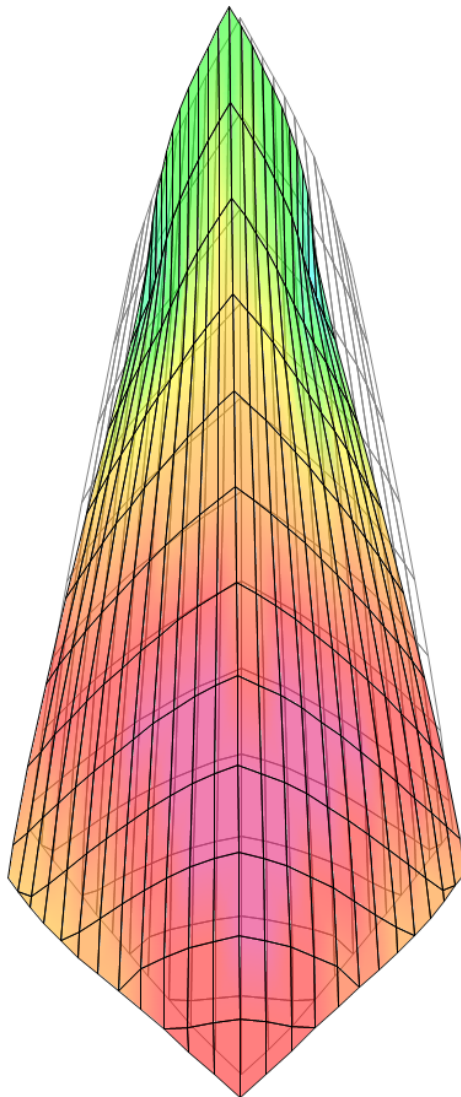
 *Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)* 

Joint	Object	3483	Joint Element	3483	
		1	2	3	
Trans		2,244E-04	0,00433	-0,00391	
Rotn		-0,001	-2,430E-05	-1,603E-05	

En el caso de los arcos interiores, la variación entre ambas combinaciones no es de gran relevancia. Esto es debido a que estas superficies están fuertemente ligadas en todos sus extremos, tanto con los arcos adyacentes, como con las cáscaras exteriores y de entrada.

Por este motivo, la mayor deformación también se dará en el vértice superior exterior, el cual se desplazará levemente en dirección del viento, además de verticalmente ya visto en el apartado anterior.

_ Deformada Hoja Superior



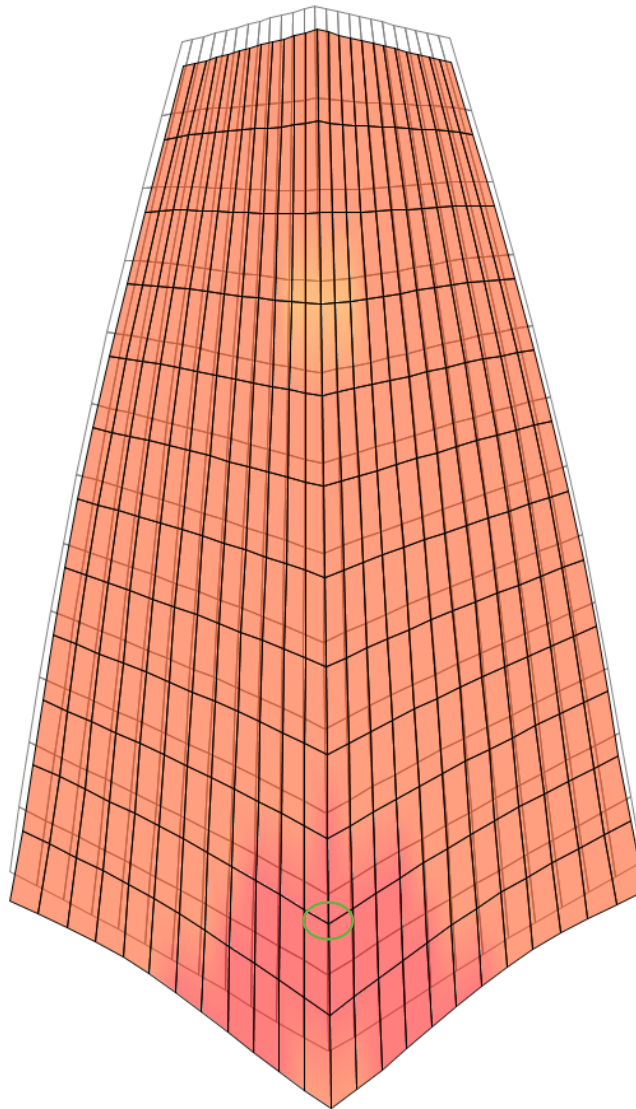
Factor de ampliación de la deformada: 200.

🚩 *Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)* ○




Joint	Object	19183	Joint Element	19183
		1	2	3
Trans		0,00511	-0,01142	-0,01276
Rotn		3,553E-04	-1,737E-04	6,029E-05

En las hojas superiores, el viento afecta, también en mayor medida, en las hojas perpendiculares a la dirección del viento. La mayor deformada se generará en el mismo punto que en la combinación ELSp, en la unión superior con las superficies adyacentes.

_ Deformada Cúpula Superior



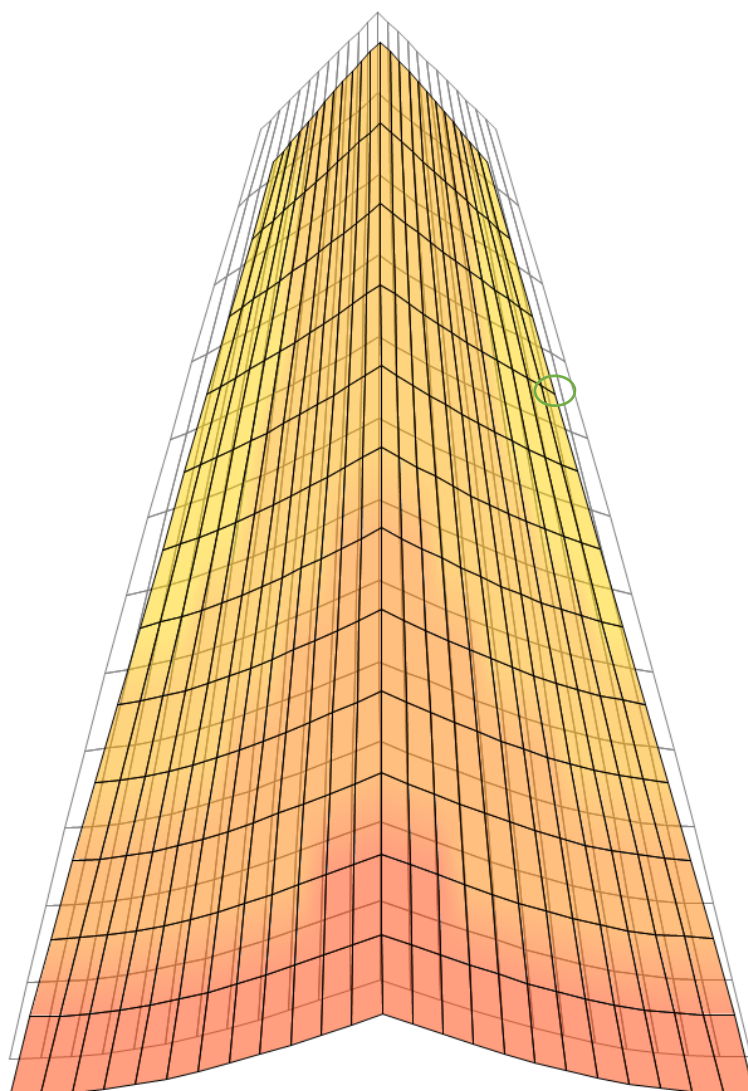
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)  

Joint	Object	15114	Joint Element	15114	
		1	2	3	
Trans		-2,418E-04	-1,946E-04	-0,00415	
Rotn		-1,254E-04	8,823E-04	2,625E-05	

Al contrario que en las anteriores, en la cúpula superior, debido al efecto del viento, las hojas perpendiculares a la acción del viento son las más afectadas. Esto es debido a la deformada que presentan, ya que favorece al desplazamiento de los puntos ya desfavorables, agudizando este efecto.

_ Deformada Cúpula Inferior



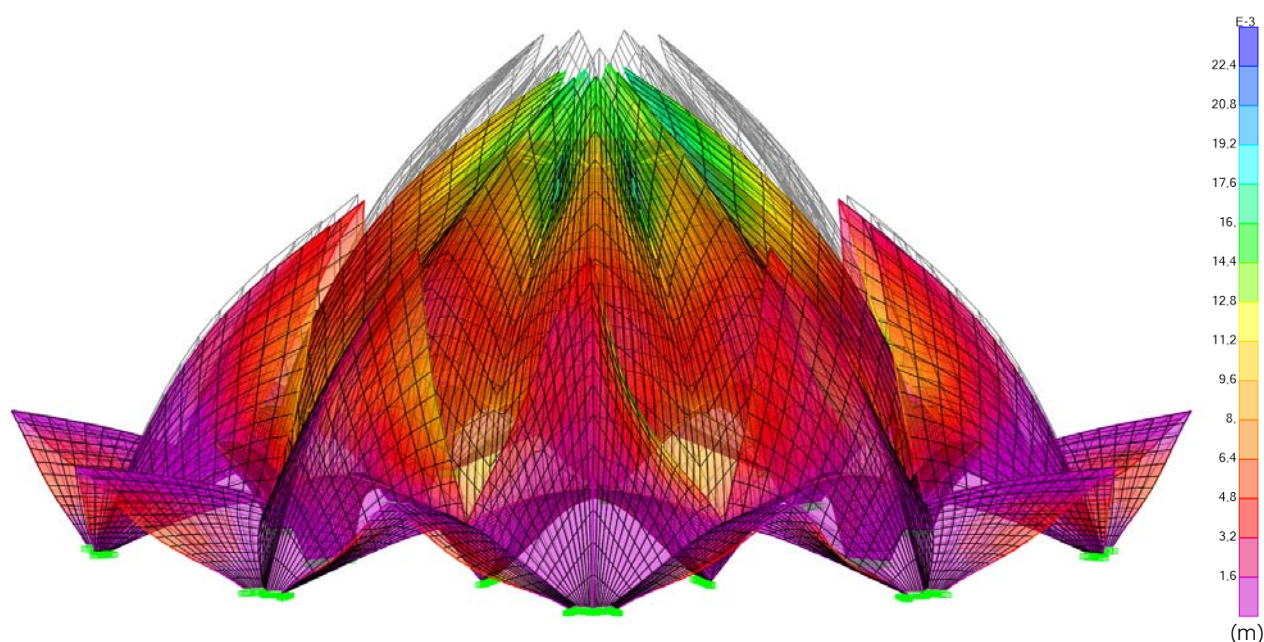
Factor de ampliación de la deformada: 200.

 *Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)* 

Joint	Object	11801	Joint Element	11801	
		1	2	3	
Trans		0,00364	0,00134	-0,0093	
Rotn		1,845E-05	-9,024E-05	-3,176E-05	

De la misma forma que la parte superior de la cúpula, en la parte inferior, también tomaremos las hojas perpendiculares a la acción del viento como las más desfavorables. Se puede observar cómo la deformada es semejante a la de la combinación anterior, con valores ligeramente superiores.

_ Deformada Modelo General



Factor de ampliación de la deformada: 200.

Desplazamientos del Punto más Desfavorable (m)

Joint	Object	19183	Joint Element	19183
		1	2	3
Trans		0,00511	-0,01142	-0,01276
Rotn		3,553E-04	-1,737E-04	6,029E-05

Al observar la deformada del edificio en conjunto, observamos como la acción del viento es relevante en ciertas partes del mismo, pero irrelevantes en otras. Esto es debido a la geometría empleada. Al tratarse de cáscaras de doble curvatura, son muy resistentes en unas direcciones, pero menos en otras.

A todo esto, le debemos añadirle la influencia de la conexión entre ellas. En los casos en los que están todas conectadas, el viento afecta en mucha menor medida que en el caso de las que no están conectadas (como es el caso de las hojas de entrada y exteriores), en las que afecta en mayor grado, cambiando la deformada.

3. Comprobación Flecha Límite

Al tratarse de una cubierta con formas geométricas curvas, sin elementos constructivos que puedan ser dañados y sin sobrecarga de uso real, no estaremos obligados a comprobarla.

De este modo, las limitaciones de la norma no serían de aplicación. Estas limitaciones son:

- Integridad constructiva: al no existir ningún elemento dañable, tratándose de una cubierta curva, no habrá ninguna limitación en este sentido.
- Confort de los usuarios: al ser, como hemos dicho, una cubierta curva no transitable para los usuarios, no corresponde comprobar esta limitación.
- Apariencia de la obra: siendo una estructura realizada geométricamente mediante curvas, el aumento de curvatura por la flecha no se podrá apreciar de manera evidente.

4. Resultados respecto ELU

Una vez visto los resultados obtenidos en los apartados anteriores, pasaremos a estudiar el efecto de las cargas correspondientes a la combinación ELU.

Para ello, dado que es en la que nos basaremos principalmente para obtener las conclusiones, la resolveremos de forma más detallada en los Anexos adjuntos.

5. Consideraciones Generales de los Cálculos

Una vez observados los resultados obtenidos de las combinaciones ELS, podemos realizar el análisis de los mismos.

Como podemos ver, se trata de una estructura compleja en la que todas sus diferentes conchas actúan directamente sobre las otras. De esta manera, los diagramas que podemos obtener de su cálculo son, de igual forma, complejos.

Como norma general, podemos observar cómo, en groso modo, estas conchas sufren mayores esfuerzos en sus vértices. Partiendo de este dato, confirmamos que la mejor modelización y posterior ejecución, consiste en colocar en estos vértices las costillas que soporten esta gran cantidad de esfuerzo.

Sobre todo, se puede observar este comportamiento en las Hojas Superiores, en las cuales, los vértices en general, y el vértice de unión superior, soporta unos esfuerzos con magnitudes excesivamente superiores al resto de concha.

Esta concentración, se efectúa en tramos específicos y de una anchura pequeña en comparación a toda la superficie. Observando esto, podemos concluir que, al colocar las costillas, éstos esfuerzos estarán incluidos en ellas, ya que con un perfil de 30 x 30 cm, los absorberán en gran medida.

Por otro lado, vemos que, el efecto del viento, que en un principio tendría que ser importante en un edificio de tales dimensiones, es irrelevante en cierto modo. Esto es debido a la propia geometría de las conchas. Al tratarse de

superficies doblemente curvadas, actúan con una gran estabilidad, tanto a las cargas gravitatorias como las laterales.

Únicamente vemos cómo el viento toma unos valores mayores, en las Hojas Exteriores situadas sobre las de entrada. En éstas hojas se puede observar mejor, ya que no están vinculadas entre ellas en sus lados derecho e izquierdo, únicamente en la parte inferior. Por este motivo, en los casos en los que el viento golpea transversalmente, la geometría adoptada no es tan eficaz, haciendo que estas hojas aumenten su deformada.

Respecto a la deformación global de la estructura, excluyendo estas hojas ya nombradas, se trata de una geometría que por sí sola, actúa en favor a la resistencia. Siendo una estructura radial y unida completamente entre todas sus partes, las cargas verticales aplicadas no pueden separar las diferentes hojas, por lo que todas las cargas se reparten entre todo el edificio. Cada una de las conchas, ayuda a mantener la geometría de la colindante, facilitando que las cargas lleguen al terreno.

Conclusiones

Llegados al final de este documento, cabe mencionar todos los aspectos relevantes a los que hemos llegado después de su realización, tanto estructurales y de comportamiento de las cáscaras de hormigón, como del valor obtenido al llevarlo a cabo.

Una vez realizado el estudio completo del edificio, hemos podido ver el comportamiento de cada una de las hojas de la estructura. De este modo hemos podido observar cáscaras con una alta rigidez debido a la geometría adoptada y cáscaras más influenciadas a la acción del viento, al estar expuestas en sentido perpendicular a su capacidad de resistencia óptima.

A su vez, hemos estudiado los diferentes comportamientos a cada una de las cargas aplicables a la estructura y cómo éstas actúan sobre ella y la deforman. En este punto cabe mencionar la multitud de deformaciones posibles que hemos visto para superficies semejantes, con similares cargas, pero con relaciones entre ellas muy complejas. De aquí podemos extraer que con siempre las estructuras complejas actúan como podemos pensar en un principio. Para ello debemos realizar un estudio exhaustivo que nos aclare estos vínculos y relaciones directas, que pueden modificar el cálculo.

En cuanto a la propia estructura estudiada, y tras todas las comprobaciones, pienso que se trata de una construcción de extremada dificultad, en el caso de realizar los cálculos con las orientaciones y características originales de proyecto. Es decir, veo necesaria la simplificación para poder llegar a una conclusión aceptable, siempre dentro de los límites apropiados de simplificación.

Además, como hemos dicho antes, al realizar estas simplificaciones, podemos acabar obteniendo ciertos cálculos variados dependiendo del sistema estructural por el que optemos. No se llega al mismo resultado en este proyecto si, en lugar de optar por superficies con los vértices nervados, optamos simplemente por cáscaras de grosor constante. De aquí el interés generado por estas modificaciones de concepto.

Por otra parte, a nivel individual de trabajo, la realización de este cálculo estructural, me ha aportado la idea y las capacidades para modelar estructuras de geometrías complejas y saber cómo resolverlas. Este punto es uno de los más valiosos bajo mi punto de vista, puesto que normalmente se suelen modelar estructuras simples de pórticos que resuelvan casuísticas sencillas. Sin embargo, al enfrentarse a un proyecto de gran magnitud y complejidad, cambia el punto de vista y las nociones que se han ido creando sobre el cálculo estructural.

También resulta de gran utilidad personal el estudio de la realización de este proyecto. Al tratarse de una construcción icónica y de gran envergadura, los procesos constructivos cambian en gran manera. A esto cabe añadirle la dificultad propia de la construcción en un país que no constaba, en ese momento, de toda la mano de obra adecuada, así como de los recursos necesarios. Por lo que es de interés conocer, qué otras opciones existen cuando alguno de los apartados que, normalmente, se dan por sentados, no están a tu alcance.

Respecto a la utilización del programa, supone un cambio de vista con respecto a los programas utilizados anteriormente. En este sentido, se trata de una dificultad añadida, ya que es un programa más complejo y con multitud de aspectos a tener en cuenta para que el resultado sea el correcto. Esto hace que, al final, el grado de detalle al que hay que llegar para poder modelarlo, es muy alto, incluyendo aspectos que antes se hubieran obviado.

En conclusión, y desde el punto de vista general de mi formación, se trata de un trabajo de muy alto valor, el cual ayuda a valorar y a definir multitud de conceptos que, en caso de no haberlo realizado, no tendría en cuenta. Es una forma de crecer en cuanto a la elaboración de proyectos estructurales, más o menos, por cuenta propia. Esto es debido a que, aun siendo un trabajo tutorizado, es, en grandes rasgos, un ejercicio individual y propio, que ayuda a afianzar los conceptos adquiridos durante la carrera.

Opciones de Continuación del Estudio

Una vez llegado a este punto, podemos observar cómo, la complejidad de este edificio, necesita de un estudio más extenso y exhaustivo.

A partir de los resultados obtenidos de las superficies, y siguiendo el ejemplo ya realizado, podríamos concluir la ejecución detallada de cada una de las hojas, siguiendo este modelo de cálculo adoptado.

Por otra parte, podríamos continuar con el cambio de modelo simplificado de cálculo. Uno de los cambios puede ser la sustitución de parte de las costillas de las hojas con menos solicitaciones y esfuerzos, facilitando su construcción.

Una vez obtenido este segundo modelo, podemos estudiar las diferencias entre ambas y escoger la mejor y más adecuada.

Así mismo, y enfocando en el sentido opuesto, se podría ejecutar el análisis estructural, pasando del uso de las costillas en los vértices, a una serie de costillas de menor dimensión, que se reparta por toda la superficie.

Por último, y observando los datos ya obtenidos, podríamos optar por una estructura de mayor complejidad, eliminando toda costilla de refuerzo. Así se generarían una serie de superficies de espesor variable y de compleja ejecución, ya que estas superficies deberían soportar la totalidad de las cargas.

Con estas diferentes y múltiples opciones de cálculo, podemos observar cómo, con los medios suficientes, se puede llegar a un nivel de detalle óptimo para valorar la ejecución real del edificio, así como las posibles opciones a las que se podría haber llegado, o las razones por las que éstas se obviaron.

Bibliografía

- S. Naharoy. *"Architectural Blossoming of the Lotus"*. Recuperado de <http://www.bahaihouseofworship.in/architecture>
- Bahá'í Association at The University of Georgia. *"Bahá'í Houses of Worship, India; The Lotus of Bahapur"*. 2003.
- National Spiritual Assembly of the Bahá'ís of India. *"Architecture of the Bahá'í House of Worship"*. 2012.
- David Gallardo Llopis. *"Introducción a SAP2000 para Arquitectura"*. Universitat Politècnica de València.
- Evelyn Gonzalez Mueses. *"La Complejidad en la Arquitectura"*. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/56191747/La-Complejidad-en-Arquitectura>
- <http://www.bahaihouseofworship.in/architecture>
- [https://es.wikiarquitectura.com/index.php/Templo_de_Loto\(Casa_de_Culto_Baha'i\)](https://es.wikiarquitectura.com/index.php/Templo_de_Loto(Casa_de_Culto_Baha'i))
- <http://megaconstrucciones.net/?construccion=templo-del-loto>
- <http://www.p4panorama.com/panos/lotustemple/index.html>